



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

COMPOSIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS AÉREAS DE ALTA-RESOLUÇÃO OBTIDAS COM DRONE

**Autores: Guilherme Henrique Medeiros Casseiro
Hugo Borges Pinto**

Orientador: Dr. Marcelino Monteiro de Andrade

**Brasília, DF
2014**



Guilherme Henrique Medeiros Casseiro
Hugo Borges Pinto

COMPOSIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS AÉREAS DE ALTA-RESOLUÇÃO OBTIDAS COM DRONE

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Eletrônico

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Marcelino Monteiro de Andrade

Brasília, DF

2014

Guilherme Henrique Medeiros Cassemiro

Hugo Borges Pinto

COMPOSIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS AÉREAS DE ALTA-
RESOLUÇÃO OBTIDAS COM DRONE/ Guilherme Henrique Medeiros Casse-
miro

Hugo Borges Pinto. – Brasília, DF, 2014-

80 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Marcelino Monteiro de Andrade

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA , 2014.

1. VANT. 2. MOSAICO. I. Dr. Marcelino Monteiro de Andrade. II.
Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. COMPOSIÇÃO E PRO-
CESSAMENTO DE IMAGENS AÉREAS DE ALTA-RESOLUÇÃO OBTIDAS
COM DRONE

CDU 02:141:005.6

Guilherme Henrique Medeiros Cassemiro
Hugo Borges Pinto

COMPOSIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS AÉREAS DE ALTA-RESOLUÇÃO OBTIDAS COM DRONE

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Eletrônico

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 03 de dezembro de 2014:

Dr. Marcelino Monteiro de Andrade
Orientador

Dr. Fábio Macedo Mendes
Convidado 1

Me. Renan Utida Ferreira
Convidado 2

Brasília, DF
2014

Agradecimentos

Guilherme Henrique Medeiros Cassemiro

Em primeiro lugar agradeço a Deus por todos os favorecimentos e desafios que tem me dado. Aos meus irmãos Paula e Bruno por sempre me ajudar e se fazerem presentes em minha vida. Agradeço especialmente ao meu Pai pelas broncas dadas, pelo investimento financeiro e afetivo, por sempre ter me apoiado nas minhas decisões e pelo apoio dado nos caminhos certos ou errados que trilhei em minha vida. Em especial também a minha mãe por sempre acreditar em mim, ser paciente, amável e sempre querer o meu bem. Ao meu padrinho Dr. Amario Cassemiro por ter me dado um carro para eu poder me deslocar até a faculdade. Também agradeço ao agregado da família, amigo e irmão Thiago Silva, pois sempre se faz presente em minha vida.

Agradecemos também aos membros da família Braz, que de alguma forma contribuíram para esse momento.

A toda a equipe de Engenharia Eletrônica do campus Gama da Universidade de Brasília por acreditar neste projeto de expansão da Universidade. Ao meu professor e orientador Doutor Marcelino de Monteiro Andrade pelo trabalho fantástico que vem realizando junto a universidade, fazendo com que além do aprendizado técnico, o aluno tenha maior visão empreendedora e de futuro formando assim um profissional completo.

Agradeço muito também aos meus amigos que conheci na faculdade que se não fosse por eles hoje eu não estaria aonde estou. Junto a eles obtive forças para acreditar e avançar na minha formação acadêmica. São eles: Luis Gustavo, Saulo Henrique, Marcus Vinicius, Nyanne Santiago, Wallysson, Lucas Borges, Felipe Silva, Luciano de Paula, Gilvanson, Abner, Matheus Braga, Thaynara Rodrigues, Pedro Matias, Rudmar, Yasmin Lobo, Leonardo Bonifácio, Nayara Neiva e Filipe Carvalhedo.

A minha namorada e amiga Rayanne Parente que vem me ajudando neste momento de final de curso, por ter me dado tempo de sobra para me dedicar a este trabalho e por sempre ser paciente e compreensível.

Não podendo esquecer dos Los primos, pelos diversos ensinamentos de vida que aprendi junto com vocês.

A família MultiDrones por compartilhar o conhecimento sobre VANTs e o total apoio e colaboração dado. Em especial ao Antonius, Vinicuis e Everton por terem aberto as portas da empresa para que eu fizesse parte dela.

E por fim, que na verdade está sendo o começo, agradeço a todos os amigos que hoje se tornaram sócios na Volare Filmes, empresa no qual tive o prazer de fundar e colocar

em pratica todo o conhecimento passado por estes mestres que eu tive a oportunidade de ter como professores. Muito obrigado

Hugo Borges Pinto:

A Deus, pela saúde e pela benção de poder trabalhar com aquilo que gosto.

A Universidade de Brasília, por ter me propiciado uma formação de ponta no Brasil e no Exterior.

Aos professores, pelos ensinamentos que moldaram o Engenheiro que me tornei.

A minha família, por todo suporte, carinho e valores que me transmitiram desde pequeno.

A minha namorada, por seu amor incondicional e companheirismo que trouxeram luz inúmeras vezes nos momentos difíceis.

Aos meus amigos, que ajudaram a amenizar o stress do dia-a-dia com boas risadas.

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia completa para formação de mosaicos de fotos em alta-resolução de áreas de interesse por meio de fotografia aérea, abordando desde a montagem da aeronave (*multirotor*), plano de voo até a construção de uma ferramenta para processamento do mosaico gerado. A motivação para o desenvolvimento deste projeto reside na grande aplicabilidade do seu resultado final em diferentes áreas, como por exemplo o aumento da produtividade agrícola, acompanhamento de obras e diversos outros estudos a respeito da zona mapeada.

Palavras-chaves: Veículos aéreos não tripulados. Processamento de imagens. Mosaicos em alta-resolução. Multi-rotor. Agricultura.

Abstract

This work presents a complete methodology for obtaining high-resolution mosaics of desired areas by the use of aerial photography, starting from the design of the unmanned aerial vehicle (UAV), passing by the flight plan and the development of an application for processing the final mosaic. The motivation for the development of this project is the great applicability of its final results in many areas, like the increase of the productivity in agricultural, monitoring of constructions and many others studies about the mapped zone.

Key-words: Unmanned aerial vehicles. Image processing. High-Resolution mosaic. Image stitching.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Layout de Rotação da Hélices octocóptero (ARDUCOPTER, 2014). . .	19
Figura 2 – Esquemático da aeronave.	20
Figura 3 – Esquemático de conexão e funcionamento do ESC	21
Figura 4 – Sinal PWM com diferentes porcentagens de duty cycle	21
Figura 5 – GPS u-blox LEA-6H.	22
Figura 6 – Gimbal	22
Figura 7 – Geometria das fotografias: (a) Vertical; (b) baixo-obliqua; (c) alto-obliqua; e (d) par convergente (TOMMASELLI, 2009).	23
Figura 8 – Geometria da fotografia: terreno plano. (PALERMO; LEITE, 2013). .	24
Figura 9 – Diferentes tamanhos de sensores de câmeras digitais (GROUP, 2014). .	24
Figura 10 – Geometria de uma fotografia vertical (PALERMO; LEITE, 2013). . .	25
Figura 11 – Foto (A) resolução espacial de 1m/pix e foto (B) com resolução espacial de 7,62cm/pix (FLIGHT, 2014).	26
Figura 12 – Delimitação da área de interesse a ser mapeada.	26
Figura 13 – Plano de voo da aeronave	27
Figura 14 – Exemplo de distorção radial	28
Figura 15 – Antes e Depois do processo de calibração	29
Figura 16 – Exemplo de doença que pode ser identificada a partir de uma imagem aérea	33
Figura 17 – Fluxograma com a representação do algoritmo para definição de limiar	34
Figura 18 – O frame do octocóptero utilizado para a montagem da aeronave. . . .	35
Figura 19 – Motor Dualsky XM5010TE-11MR utilizado no octocóptero	36
Figura 20 – ESC utilizado na montagem do octocóptero	36
Figura 21 – Hélices utilizadas na montagem do octocóptero	37
Figura 22 – Etapas de voo de mapeamento <i>multirotor</i> octocoptero.	38
Figura 23 – Área do Campus UnB-Gama delimitada pelo espaço a ser mapeado junto com o plano de voo da missão.	39
Figura 24 – Área da chácara mapeada em Vicente Pires/DF e o plano de voo da missão.	40
Figura 25 – Área de construção civil em Asa Norte/DF mapeada utilizando equipamento <i>multirotor</i> octocóptero junto com o plano de voo da missão. .	40
Figura 26 – Área de pré plantação de milho localizada no entorno de Brasília junto com o planejamento de voo da missão.	41
Figura 27 – A esquerda, exemplo de imagem obtida neste trabalho (Com um terço da resolução máxima). A direita, imagem satelital obtida pelo Google Earth com a maior resolução possível.	45

Figura 28 – Mosaico de fotos UnB-Gama	46
Figura 29 – Posição das imagens coletadas e nível de sobreposição entre elas.	47
Figura 30 – Modelo Digital de Elevação (MDE) do mosaico UnB-Gama.	48
Figura 31 – Erro de montagem de mosaico pela carência de imagens sobrepostas.	48
Figura 32 – Divisão de um terreno feito com mosaico aéreo da propriedade rural mapeada pela equipe.	49
Figura 33 – Posição das imagens coletadas e nível de sobreposição entre elas do mosaico em área rural.	50
Figura 34 – Modelo Digital de Elevação (MDE) do mosaico área rural.	50
Figura 35 – Mosaico de fotos construção civil	51
Figura 36 – Posição das imagens coletadas e nível de sobreposição entre elas.	51
Figura 37 – Modelo Digital de Elevação (MDE) do mosaico construção civil.	52
Figura 38 – Mosaico de fotos de pré plantação de milho	52
Figura 39 – Foto de controle tirado para se obter a diferença de tempo aonde a foto foi tirada em relação ao horário do GPS	53
Figura 40 – Posição das imagens coletadas e nível de sobreposição entre elas.	53
Figura 41 – Modelo Digital de Elevação (MDE) do mosaico pré plantação de milho.	54
Figura 42 – Ferramenta de Navegação	55
Figura 43 – Ferramentas para cálculo de distâncias e áreas da região mapeada	56
Figura 44 – Exemplo de medição com a ferramenta régua - A linha em azul é tra- çada em tempo real pela ferramenta para facilitar a escolha do ponto	57
Figura 45 – Resultado da medição exibido no console, com outras informações re- levantes	57
Figura 46 – Medição da área do círculo central da quadra do Campus de Engenharia UnB Gama - Aproximadamente $28m^2$	58
Figura 47 – Imagem aérea captada na missão feita sobre o Campus UnB Gama	59
Figura 48 – Padrão da queimada selecionado	59
Figura 49 – Histograma da componente Cor	60
Figura 50 – Histograma da componente Saturação	60
Figura 51 – Histograma da componente Iluminação	60
Figura 52 – Máscara da região segmentada	61
Figura 53 – Resultado final da identificação	62
Figura 54 – Processo de construção do mosaico	65
Figura 55 – Exemplo da detecção de features	66
Figura 56 – Detecção de características entre duas imagens	67
Figura 57 – Associação de pares de características em imagens adjacentes	68
Figura 58 – Artefatos oriundos da junção de imagens	70
Figura 59 – Princípio de funcionamento da fusão linear	71
Figura 60 – Metodologia para obtenção da pirâmide	71

Figura 61 – Fusão dos laplacianos para cada nível da pirâmide	72
Figura 62 – Reconstrução da imagem a partir da pirâmide	72
Figura 63 – Comparação dos métodos para imagens com desvios de alinhamento . .	72
Figura 64 – Imagens base para implementações	74
Figura 65 – Detecção de features para imagem base 0	74
Figura 66 – Detecção de features para imagem base 1	74
Figura 67 – Casamento dos pontos-chaves encontrados anteriormente	75
Figura 68 – Estimação da matriz e sobreposição das duas imagens adjacentes . . .	75
Figura 69 – Tempo de processamento para cada algoritmo	76
Figura 70 – Quantidade de features identificadas por cada algoritmo	77

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de comparação entre os materiais alumínio e carbono (ALUMÍNIO, 2014), (EUROAKTION, 2014), (SUPERTRAT, 2013).	20
Tabela 2 – Tabela parâmetros de missão de voo UnB-Gama.	41
Tabela 3 – Tabela parâmetros de missão de voo Chacara Vicente Pires/DF.	42
Tabela 4 – Tabela parâmetros de missão de voo para mapeamento de construção civil em Asa Norte/DF.	43
Tabela 5 – Tabela parâmetros de missão de voo para mapeamento de uma pré-plantação de milho localizado próximo a Brasília/DF.	43
Tabela 6 – Erro médio da posição das imagens do mosaico UnB-Gama.	47
Tabela 7 – Erro médio da posição das imagens do mosaico área rural.	49
Tabela 8 – Erro médio da posição das imagens do mosaico pré plantação de milho.	53
Tabela 9 – Limiares encontrados para a segmentação.	61
Tabela 10 – Valores obtidos para as amostras do banco de imagens de uma vila	76
Tabela 11 – Valores obtidos para as amostras do banco de imagens agrícolas	76

Lista de abreviaturas e siglas

VANT	Veículo Aéreo não Tripulado
VARP	Veículo Aéreo Remotamente Pilotado
ARC	Aeronave Remotamente Controlada
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicles</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
FPS	<i>Frames-Per-Second</i>
GCS	<i>Ground Control Station</i>
PWM	<i>Pulse-width modulation</i>
PPM	<i>Pulse-position modulation</i>
ESC	<i>Electronic Speed Control</i>
FOV	<i>Field of View</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
BGR	<i>Blue Green Red</i>
HLS	<i>Hue Lightness Saturation</i>
DSM	Modelo digital de superfície

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo geral	16
1.3.2	Objetivo específico	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Escolha da aeronave	18
2.2	Especificação do <i>multirotor</i> escolhido	19
2.3	Geometria das fotos	22
2.4	<i>Ground Control Station</i> (GCS)	25
2.5	Calibração da câmera	27
2.6	Gestão de Recursos Computacionais	31
2.7	Algoritmo de segmentação no espaço de cores	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	Materiais	35
3.1.1	Aeronave	35
3.1.2	Softwares	37
3.2	Métodos	38
3.2.1	Áreas mapeadas	39
3.2.1.1	Campus UnB-Gama	39
3.2.1.2	Chácara - Área Rural	39
3.2.1.3	Construção Civil	40
3.2.1.4	Pré plantação	40
3.2.2	Planejamento das missões	41
3.2.2.1	Campus UnB-Gama	41
3.2.2.2	Chácara - Área Rural	41
3.2.2.3	Construção Civil	42
3.2.2.4	Pré plantação	43
3.2.3	Georreferenciamento	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Qualidade da imagem	45
4.2	Mosaicos Realizados	45

4.2.1	Faculdade UnB-Gama	46
4.2.2	Chácara - Área Rural	48
4.2.3	Construção civil	50
4.2.4	Pré-plantação de milho	52
4.3	Software de processamento	54
4.3.1	Navegação	55
4.3.2	Medições	56
4.3.3	Georreferenciamento	58
4.3.4	Segmentação por cores	58
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	63
6	ANEXOS	65
6.1	Algoritmo para formação do mosaico	65
6.1.1	Visão geral do processo	65
6.1.2	Extração de características	66
6.1.3	Matching	67
6.1.4	Filtragem de matches	68
6.1.5	Estimação da matriz de transformação	69
6.1.6	Superposição	69
6.1.7	Suavização de junções	70
6.1.8	Performance da Extração de características	73
6.1.9	Extração de características	73
6.1.10	Casamento de pontos-chaves	75
6.2	Perfomance dos algoritmos de detecção de features	76
	Referências	78

1 Introdução

Antigamente, quando havia a necessidade de se efetuar o registro aéreo de uma região, quase sempre se recorria ao uso de uma aeronave de pequeno porte. Nela embarcava-se um fotógrafo, que era o responsável por fotografar as áreas de interesse. Esta técnica foi muito utilizada para se obter imagens aéreas de cidades no passado.

Com a evolução da eletrônica, da engenharia aeroespacial e de outras áreas do conhecimento, surgiram técnicas cada vez mais eficientes, precisas e rápidas para se efetuar o imageamento aéreo. Dentre elas, pode-se citar a utilização de satélites e câmeras multiespectrais para o imageamento e estudo da superfície terrestre.

A utilização de Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs) tem se mostrado uma excelente alternativa, dado que dispõe de uma flexibilidade maior e um custo baixo comparado ao das soluções tradicionais. Comparados ao imageamento feito por aeronaves tripuladas, eles possuem a vantagem de possibilitar pilotagem remota (eliminando o risco de acidentes com a tripulação durante o processo) e voos mais próximos ao solo. O uso de VANTs tem aumentado nos últimos anos, tornando sua aquisição acessível até mesmo para particulares.

Atualmente uma das maiores necessidades no âmbito do imageamento remoto é o monitoramento de situações críticas, como multidões, ações criminosas, desastres naturais e etc. Nestes casos, pelo grande dinamismo exigido, a utilização de sistemas espaciais se torna inviável não só por seus custos elevados mas também pelo baixo nível de adaptabilidade a novas missões.

Concomitante a isso, estão as aplicações práticas dessas aeronaves, que vão desde imageamento aéreo (assunto deste trabalho) até auxílio no salvamento de pessoas em afogamento e *delivery* de produtos.

1.1 Contextualização

Os VANTs são divididos em duas categorias: asas fixas e asas rotativas. Este trabalho tem como foco os VANTs de asas rotativas, ou *multirotors*.

O VANT tem sido utilizado para montagem de mapas, pois é possível obter maior atualização das informações aliado ao baixo custo do equipamento e automação de todo o processo (JúNIOR; CÔRTES; FERREIRA, 2014).

É possível utilizar este mosaico aéreo para o monitoramento de plantações. Um mosaico agrícola feito por uma câmera com sensor infravermelho pode gerar informações

de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (WORLD, 2014). O NDVI ou índice de vegetação por diferença normalizada é um índice utilizado para estudos ambientais que permite a realização de análises, em diferentes escalas, sobre a cobertura vegetal de determinada região (ARAUJO et al., 2010).

Surgem também aplicações em minas e pedreiras, onde a construção e a manutenção requerem estudo ambiental contínuo. Em uma mina, é possível analisar a distância entre a lagoa de rejeitos e a barragem, que é regulada por normas ambientais rígidas. É possível determinar curvas de nível, gerar um modelo digital de superfície (DSM) e realizar cálculos volumétricos. O uso de VANTs torna este serviço mais ágil, barato e seguro fazendo com que seu uso seja totalmente atrativo (INTERNATIONAL, 2014).

1.2 Justificativa

Usando esse novo método de geração de mosaicos georreferenciados, pode-se ter uma maior resolução da área que se está mapeando. Sendo assim consegue-se retirar informações mais precisas e que auxiliam no processo de tomadas de decisão.

Neste trabalho, será proposto um método de geração de mosaicos aéreos georreferenciados de pequenas propriedades, acompanhamento de construção civil e pré-plantação de milho, bem como o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie a extração de informações relevantes.

O resultado final deste trabalho servirá de base para diversos estudos. Dentre outras coisas, será possível utilizar processamento digital de imagens para determinar porcentagem de área plantada, analisar a presença de agentes nocivos à plantação, identificar falhas no plantio além de diversos outros dados que podem ser extraídos de forma automatizada ou semi-automatizada.

A importância do georreferenciamento está na necessidade de conhecer a posição real de elementos identificados na imagem, além de permitir a realização de medições utilizando a própria foto como referência.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

A proposta do trabalho é apresentar uma solução de mapeamento aéreo com um Veículo Aéreo Não Tripulado *multirotor* do tipo octocóptero visando a obtenção de um mosaico georreferenciado que possa ser processado para extração de informações relevantes para as mais diversas aplicações.

1.3.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos são:

- Conceber uma plataforma aérea do tipo *multirotor* aplicada às necessidades do projeto.
- Estabelecer estratégias de aquisição eficaz de imagem.
- Desenvolver um software que auxilie na extração de informações úteis do mosaico georreferenciado.

2 Fundamentação Teórica

A seguir, serão abordados os diferentes processos de aquisição da imagem aérea, a estrutura do *multirotor* e o pós processamento dessas imagens no *software* desenvolvido pela equipe para facilitar a extração de informações relevantes do mosaico georreferenciado.

2.1 Escolha da aeronave

Para fazer a escolha adequada da aeronave a ser usada, é necessário avaliar o tipo de aplicação que esse aparelho irá exercer, uma vez que diferentes aplicações requerem diferentes tipos de equipamentos.

Os aparelhos mais comumente usados para aquisição de fotos aéreas são: satélites, aviões comerciais, VANT asa fixa e VANT asa rotativa (*multirotores*).

O uso de avião para realizar a coleta de fotos para mapeamento aéreo começou a ser complementado e por algumas vezes substituído pelos VANTS de asa fixa e asa rotativa, pois este tipo de veículo tem diversas vantagens em relação ao uso convencional de avião. Uma delas é a possibilidade de voar em menores altitudes.

Segundo a ANAC, a altitude mínima que um avião tripulado pode voar é de 300 metros (ANAC, 2010). O avião tem uma ampla cobertura, mas o nível de resolução por pixel é menor, o que inviabiliza muitas aplicações onde o nível de detalhe é crítico. Os satélites, de forma similar, não conseguem oferecer o mesmo nível de detalhamento obtido com o uso dos VANT's, além do serviço ser restritivo do ponto de vista econômico e da não adaptabilidade do equipamento.

Já a utilização de *multirotores* vem aumentando nos últimos anos, principalmente pela possibilidade da aeronave ficar estável sobre o ponto específico onde a foto irá ser tirada. Isso proporciona ao *multirotor* precisão de imagem dificilmente obtível por outros métodos.

O grande empecilho ao se optar por este tipo de aeronave é a restrição no tempo de voo, a falta de aerodinâmica, a baixa eficiência dos motores e a dificuldade de armazenar carga em baterias leves compõem as principais limitações dessa tecnologia. Contudo, mesmo com o tempo de voo reduzido, é possível mapear áreas de até 100ha desde que se faça mais de um voo substituindo as baterias de tempos em tempos.



Figura 1 – Layout de Rotação da Hélices octocóptero (ARDUCOPTER, 2014).

2.2 Especificação do *multirotor* escolhido

O *multirotor* é uma plataforma aérea que possui sua força de sustentação dividida entre os múltiplos motores de mesma potência, de forma que o torque das reações se cancelam entre si. Esta característica o permite pairar sobre um ponto fixo (CARVALHEDO; SIQUEIRA, 2013).

Neste projeto será usado apenas o *multirotor* de oito hélices, popularmente referido como octocóptero. O *layout* desse aparelho com a rotação de cada hélice pode ser vista na figura 1.

Um octocóptero dispõe de oito motores e cada um é responsável por gerar uma força de impulsão e momento em torno do seu centro de rotação. Como pode ser visto na figura 1 os motores estão emparelhados dois a dois, onde cada par gira em um sentido diferente. As hélices 3, 4, 5 e 6 giram no sentido anti-horário, enquanto as hélices 1, 2, 7 e 8 giram no sentido horário. Com esta configuração o motor de cauda existente nos helicópteros comuns deixa de ser necessário.

A figura 2, mostra um esquemático dos principais componentes utilizados em um *multirotor* do tipo octocoptero para o fim de mapeamento aéreo.

A estrutura principal do aparelho onde são alocados todos os componentes se chama *frame*. O *frame* de carbono é o mais utilizado para *multirotors* por apresentar diversas vantagens em relação a outros materiais. Se comparado ao alumínio, que é o segundo material mais utilizado neste tipo de aplicação, pode-se perceber que o carbono leva vantagem em todos os aspectos comparados, vide Tabela 1

Para este aparelho foram usados oito motores *Brushless* (sem escovas) de alta rotação. Os motores *Brushless* possuem três fios que formam as bobinas que podem ser ligadas em forma de estrela ou no formato delta. Quando são ligadas em estrela elas possuem um consumo menor e quando ligadas em delta possuem uma torção maior, já

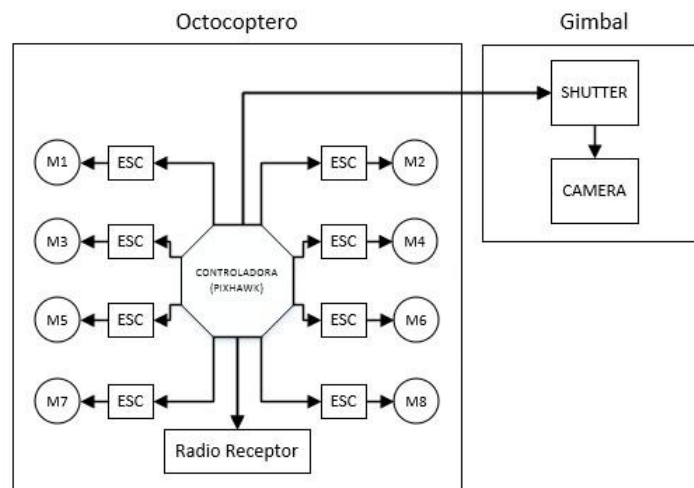


Figura 2 – Esquemático da aeronave.

Material	Massa Específica (Kg/m^3)	Limite de Resistência a tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Temperatura de Fusão (C)
Alumínio	2725	48	69	660
Carbono de alta resistência	1750	5660	276	3700

Tabela 1 – Tabela de comparação entre os materiais alumínio e carbono (ALUMÍNI, 2014), (EUROAKTION, 2014), (SUPERTRAT, 2013).

que a corrente é igual para as três bobinas (FILHO; RUDIGER; NASCIMENTO, 2011).

Essas bobinas, por sua vez, são ativadas a cada pulso emitido por uma unidade controladora de velocidade chamada de ESC (*Electronic Speed Control*). Este componente tem a importante função de acionar o motor ditando o ritmo de funcionamento de acordo com a energia gerada, pois é ele que irá acionar sequencialmente as bobinas de acordo com a largura de pulso emitido pela placa controladora (FILHO; RUDIGER; NASCIMENTO, 2011).

O sinal PWM (*Pulse Width Modulation* ou Modulação por Largura de Pulso) varia entre dois níveis de tensão. Quanto maior o período em nível alto, maior será o *duty cycle*. O ESC irá controlar a velocidade dos motores *brushless* através do *duty cycle* fornecido pelo sinal PWM. Dessa forma, quanto maior o tempo em alto, maior será a velocidade do motor. Essa variação ocorre tão rápido que a velocidade do motor é controlada quase que instantaneamente (FILHO; RUDIGER; NASCIMENTO, 2011).

A hélice é um conjunto de pás com o mesmo centro, que ao ser girado causa uma propulsão na mesma direção. Utiliza-se duas pás por hélice. Quanto maior o passo da hélice, maior a velocidade alcançada pela aeronave e mais lenta é a resposta à manobras. Logo, o ideal é que o passo da hélice seja pequeno, pois é preferível uma melhor resposta

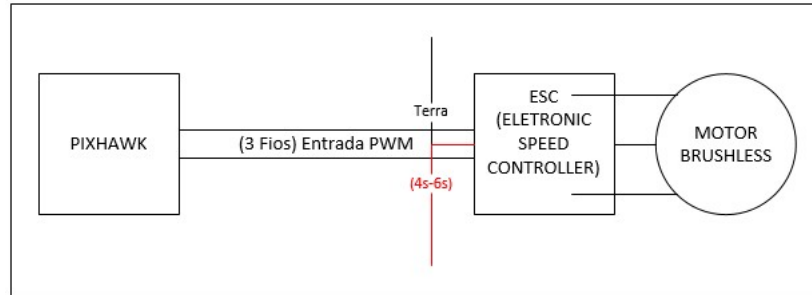


Figura 3 – Esquemático de conexão e funcionamento do ESC

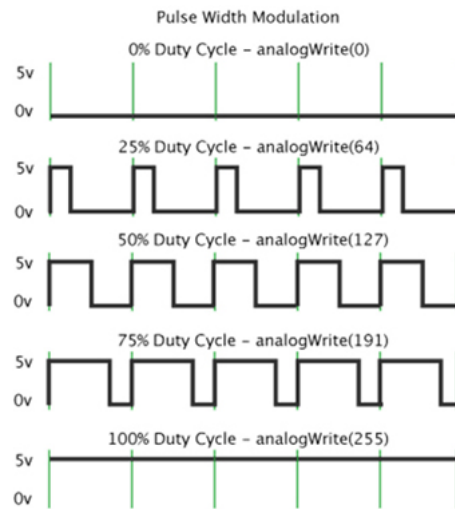


Figura 4 – Sinal PWM com diferentes porcentagens de duty cycle

à manobras, mesmo que seja preciso abrir mão de velocidade para tal (VIOLATO, 2006).

A placa controladora é o componente mais crítico da aeronave pois é ela quem controla (por meio dos dados captados por sensores) a estabilidade e precisão milimétrica na movimentação do VANT em vôos autônomos. Além disto, ela tem a função de receber e atuar conforme os comandos recebidos via rádio.

Os sensores utilizados na coleta de dados para estabilização da aeronave são: acelerômetro, magnetômetro, giroscópio, barômetro e GPS. Alguns deles já disponíveis no *hardware* da própria controladora, outros externos.

O GPS é de extrema importância para este projeto, uma vez que as informações fornecidas serialmente por esse componente auxiliam não só na estabilização da aeronave, mas também na própria dinâmica de *waypoints*, responsável por disparar o *hardware* da câmera em coordenadas específicas atingidas durante o vôo.

Após processar as informações destes sensores, a placa controladora envia sinais PWM para os ESCs que irão coordenar cada um dos oito motores da aeronave. O *multi-rotor* tem ainda um transmissor e receptor de vídeo que é responsável pela captura dos sinais de vídeo da câmera fixada ao *multirotor* e transmissão do mesmo para o piloto em



Figura 5 – GPS u-blox LEA-6H.

terra.

O gimbal - Figura 6 - é um suporte para a câmera cujo objetivo principal é garantir a estabilização da mesma nos três eixos de rotação. Ele ameniza, portanto, as imperfeições que podem aparecer nas imagens pelo fato da aeronave não está bem estabilizada no ar.

Essa precisão é essencial não só para a qualidade subjetiva da imagem, mas também para o processo de montagem do mosaico, pois a nitidez das fotos favorece o sucesso da montagem do mosaico posteriormente.



Figura 6 – Gimbal

2.3 Geometria das fotos

As fotografias aéreas podem ser classificadas em verticais e oblíquas. As fotos verticais são tiradas verticalmente em relação ao aparelho. As fotos que possuem alguma

inclinação em relação ao solo são chamadas oblíquas e são divididas em alta e baixa-oblíqua, caso mostrem ou não o horizonte (TOMMASELLI, 2009). Na figura 7 podemos ver a diferença na classificação dessas imagens.

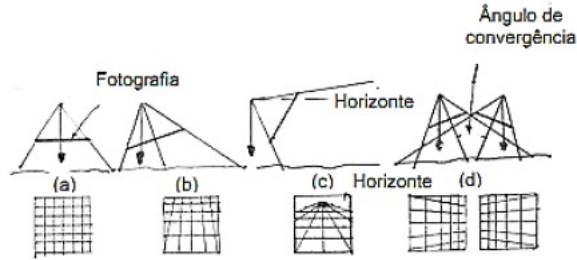


Figura 7 – Geometria das fotografias: (a) Vertical; (b) baixo-oblíqua; (c) alto-oblíqua; e (d) par convergente (TOMMASELLI, 2009).

As fotos para a geração de mosaicos precisam ser tiradas verticalmente. Em uma fotografia aérea vertical, pode-se retirar relações geométricas do terreno a ser mapeado. A figura 8 mostra as diversas relações contidas nesse modelo geométrico criado pelas características da câmera e pela distância da foto até o chão. Na figura 8, pode-se notar a presença dos planos negativo e positivo da fotografia. O plano negativo é o tamanho do sensor dentro da câmera. De acordo com a escolha da lente, a distância focal muda, variando assim a distância o'CP - vide Figura 8 - e também a distância do plano negativo até o plano positivo (PALERMO; LEITE, 2013).

Os eixos x e y são os eixos de referência da foto. É importante saber onde se definiram esses eixos para que as fotos tenham as direções corretas para serem sobrepostas. Os pontos A, B, C e D, que estão no terreno, ficarão guardados de forma que a foto seja invertida no negativo, que tem as posições a', b', c' e d' (PALERMO; LEITE, 2013).

Podem-se retirar relações matemáticas a partir do modelo geométrico de captura da foto sobre o terreno. Através de uma visualização em duas dimensões dessas relações, como pode ser observado na figura 10, é possível através de semelhança de triângulos obter uma equação que relaciona o tamanho do sensor, o tamanho do terreno coberto pela foto, a distância focal e a altitude de voo (PALERMO; LEITE, 2013). A equação é apresentada a seguir:

$$S = ab/AB = f/Z \quad (2.1)$$

Onde ab é a o tamanho do sensor da câmera, AB e a distância do terreno compreendido pela foto, f é a distância focal e Z é a altitude do voo (PALERMO; LEITE, 2013).

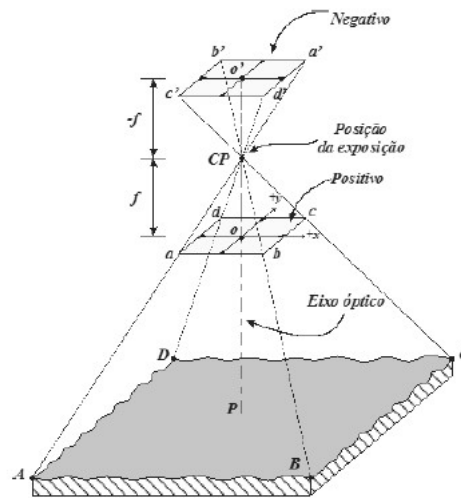


Figura 8 – Geometria da fotografia: terreno plano. (PALERMO; LEITE, 2013).

Sensor size comparison chart									
Type	1/3"	1/2"	2/3"	4/3"	APS-C	Canon Nikon Pentax DX	Super 35	APS-H	35mm Full Frame
sensor w x h	4.8 x 3.6mm	6.4 x 4.8mm	8.8 x 6.6mm	17.8 x 10mm	22.2 x 14.8mm	23.6 x 15.5mm*	24.89 x 18.66mm	28.7 x 19.1mm	36 x 24mm
sensor diagonal	6mm	8mm	11mm	20.41mm	26.7mm	28.4mm	31.1mm	34.5mm	43.3mm
sensor area	17.3mm ²	30.7mm ²	58.1mm ²	178mm ²	329mm ²	366mm ² *	464.44mm ²	548mm ²	864mm ²
crop factor	7.21	5.41	3.93	2	1.62	1.52	1.39	1.26	1
applicable cameras				Panasonic AG-AF101	Canon EOS 7D Canon EOS 60D Canon EOS 50D Sony NEX-VG10E	*Approx Arri Alexa Sony PMW-F3 Sony SRW-9000PL Sony F35		Canon EOS 5D MkII Nikon D3s	

Figura 9 – Diferentes tamanhos de sensores de câmeras digitais (GROUP, 2014).

De acordo com a equação 2.1, quanto maior o tamanho do sensor, maior será a área em solo abarcada. Logo, uma câmera com sensor maior é mais adequada para o uso em mapeamentos, pois irá cobrir a mesma área em menor tempo ou mapear áreas maiores com o mesmo tempo que câmeras com sensores menores.

O grande problema de se usar câmeras com sensores cada vez maiores é a elevação dos custos e do peso do equipamento. A figura 9 mostra os diferentes tamanhos de sensores existentes no mercado.

Analisando a distância focal na equação 2.1, nota-se que quanto menor a distância focal maior será a área abrangida. Porém, lentes que têm distância focal menor que 50mm terão que passar por processos de calibração para desfazer as distorções radiais associadas a elas (GONZALES; WOODS, 2000).

Com essa equação pode-se definir a informação de escala de foto e entender como estão relacionados os diferentes parâmetros de entrada oferecidos pelo *software* de planejamento de missão e ajusta-los conforme seja necessário.

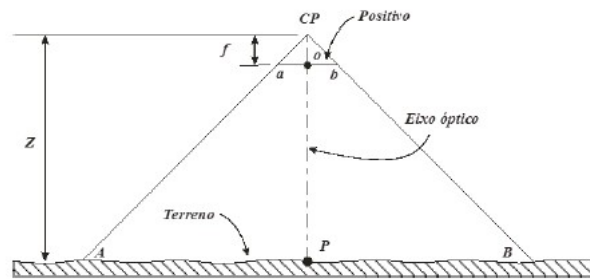


Figura 10 – Geometria de uma fotografia vertical (PALERMO; LEITE, 2013).

2.4 Ground Control Station (GCS)

O planejamento de voo é feito via *Ground Control Station* ou estação de controle em solo. O GCS utilizado para este trabalho foi o *Mission Planner*, plataforma *open-source* da empresa 3DRobotics, que é compatível com a placa controladora (Pixhawk) utilizada no *multirotor*. O planejamento da missão é iniciado selecionando a área a ser mapeada. Essa área é delimitada através de mapas de satélites carregados pelo programa via *internet*. Caso o local a ser o mapeado não tenha acesso a *internet*, é preciso fazer o download dos mapas previamente (ARDUPILOT, 2014).

Antes de delimitar a área a ser mapeada, é preciso realizar testes controlados de voos com o aparelho a fim de conhecer o seu tempo de voo, que não pode superar o valor estimado pelo GSC em uma missão de mapeamento. Caso isso ocorra, o aparelho pode cair.

O tempo de voo máximo do equipamento montado pela equipe é de 15 minutos. Caso a área de interesse exceda a capacidade de cobertura da aeronave, mais voos serão necessários. A Figura 12 mostra um exemplo de área de interesse a ser mapeada.

Com a área predeterminada, o programa irá calcular uma estimativa de tempo de voo e dará algumas opções de parâmetros de entrada, que são: câmera fotográfica, velocidade e altitude do equipamento e sobreposição longitudinal e lateral das fotos.

Realizada a escolha prévia da câmera e da lente, é possível definir a altitude de voo e ajustar a resolução no solo da foto, que é o segundo parâmetro a ser definido. Este parâmetro é dado em centímetros por *pixels* (cm/pix). Quanto maior a altitude, maior é a área em terra ocupada por um pixel e menor será a resolução no solo.

Quanto menor a altitude melhor é a qualidade da foto. Com isso é possível extrair informações mais precisas e detalhadas.

Na figura 11 pode ser notado a diferença entre uma foto com resolução de 1m/pix e 7,62cm/pix, onde é possível perceber os detalhes das menores estruturas. Portanto câmeras com maior resolução serão mais atraentes para este tipo de aplicação.

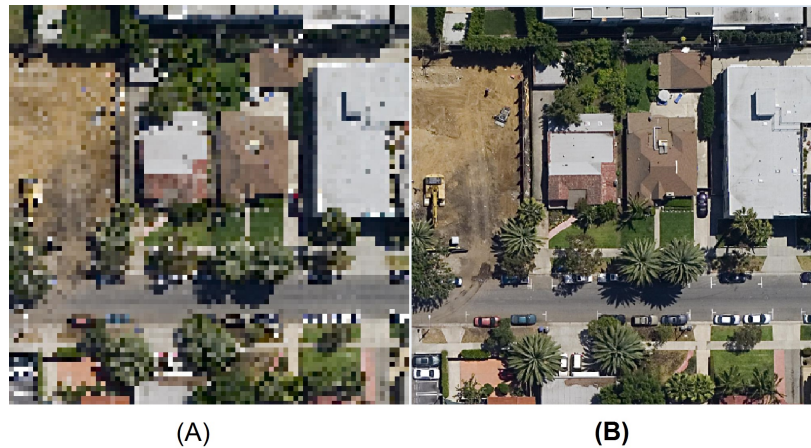


Figura 11 – Foto (A) resolução espacial de 1m/pix e foto (B) com resolução espacial de 7,62cm/pix (FLIGHT, 2014).

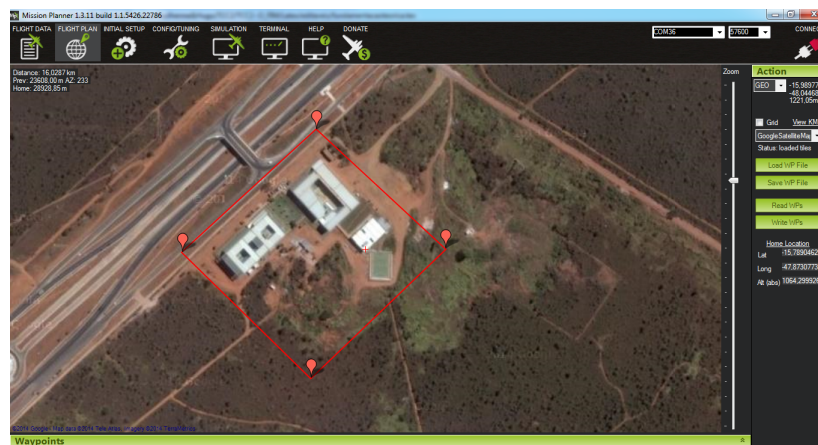


Figura 12 – Delimitação da área de interesse a ser mapeada.

Para que a composição do mosaico ocorra é preciso que as fotos tenham sobreposição entre si. Essa sobreposição de fotos é geralmente de 55% a 65% sobre as fotos tiradas longitudinalmente e de 20% a 40% sobre as fotos sobrepostas lateralmente (BO-SAK, 2009). A figura 13, mostra como ocorre a missão para que se alcance a sobreposição das imagens para a geração do mosaico. Os valores de sobreposição são definidos através da imagem gerada do solo que está diretamente relacionado com o tamanho do sensor utilizado pela câmera.

Aumentando os valores de sobreposição longitudinal o número de fotos tiradas irá aumentar uma vez que a área coberta entre essas fotos será maior, porém não afetará o tempo de voo do aparelho. Somente o intervalo de tempo entre os disparos de fotos será diminuído. Já o aumento de sobreposição lateral poderá interferir no tempo de voo, uma vez que o número de trajetórias feitas poderá ser maior.

O aumento da sobreposição longitudinal é feita quando há grandes diferenças de altura do terreno mapeado e só se aumenta a sobreposição lateral quando o equipamento varia muito seu deslocamento ou quando a área mapeada é muito homogênea.

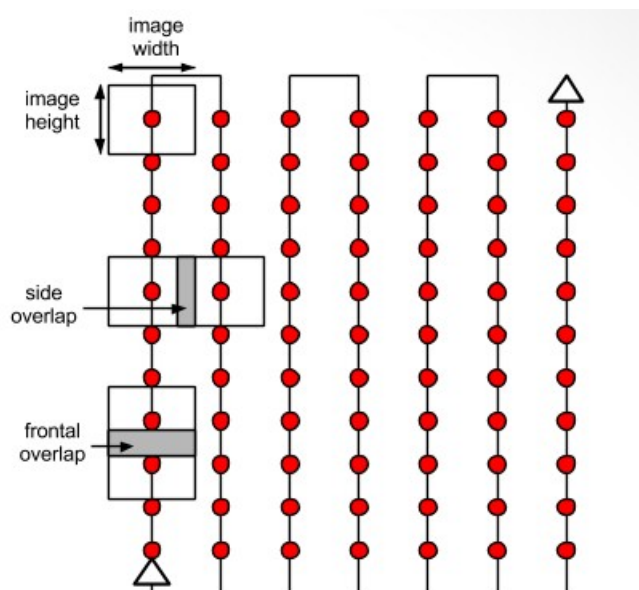


Figura 13 – Plano de voo da aeronave

O disparo entre duas fotos em uma câmera fotográfica é limitado, uma vez que existe um intervalo de tempo para capturar e armazenar a imagem na memória. Com isso, o aumento da sobreposição longitudinal tem um limite que é delimitado por este intervalo. O desrespeito deste período levará ao não acionamento da câmera e isso afeta negativamente o processo de montagem do mosaico, uma vez que faltarão fotos e informações cruciais para a realização deste processo. Para a câmera fotográfica usada neste trabalho (Sony NEX-7) o intervalo mínimo entre duas fotos tiradas é de 0,1 segundos (SONY, 2014).

2.5 Calibração da câmera

A Fotogrametria é o modo de retirar através de fotos informações confiáveis de objetos físicos e do meio ambiente (TOMMASELLI, 2009)).

As câmeras usadas em fotogrametria são classificadas em métricas e não-métricas, podendo ser analógicas ou digitais. O sensor é geralmente composto por um circuito integrado com elementos sensíveis à luz - os pixels. O circuito integrado pode ser de dois tipos: CCD ou CMOS (PALERMO; LEITE, 2013).

As câmeras métricas são especiais para a geração de fotos aéreas, contudo, possuem alto custo e são pesadas. As câmeras utilizadas para esse projeto são não-métricas pois são de uso em fotografia convencional e não possuem exatidão geométrica, nem dispositivos que garantam a obtenção de uma imagem geometricamente fidedigna (TOMMASELLI, 2009). Este tipo de câmera só pode ser utilizado para a fotogrametria se submetida à calibração.

As câmeras de pequeno formato possuem até 15 megapixels (MP). Essa resolução é obtida multiplicando o número de pixels por linha e o número de colunas do sensor. Este tipo de câmera vem sendo bastante empregado atualmente em VANT.

Para que se possa costurar as fotos no algoritmo do mosaico é preciso que as imagens possuam aspecto plano. Além disso, para extrair medidas reais é necessário que a foto esteja livre de distorções geométricas (GONZALES; WOODS, 2000).

Normalmente, as imagens capturadas por câmeras convencionais possuem uma distorção associada que pode ser proveniente de diversas fontes: geometria das lentes ou por montagem imperfeita (DOC. OPENCV 2.8, 2014).

A distorção associada à geometria das lentes geralmente está relacionada ao aumento do campo de visão da câmera. Utilizam-se lentes convexas para maximizar o FOV (*Field Of View*) e em contrapartida, é introduzido uma distorção radial na imagem.

Nos testes iniciais feitos neste trabalho foi identificado este efeito (vide a Figura 14). Utilizou-se uma câmera GoPRO 2 para aquisição de imagens e imediatamente foi detectada a distorção em formato esférico no centro da foto. Uma maneira de contornar este problema é realizar calibração da câmera.



Figura 14 – Exemplo de distorção radial

O processo de calibração consiste em, a partir de um modelo matemático para as distorções, estimar os parâmetros propostos com base nas relações das medições reais e das métricas extraídas da imagem capturada. No geral existem diversos métodos para efetuar esta calibração.

A documentação existente do OpenCV (DOC. OPENCV 2.8, 2014) sugere a utilização de um código automatizado para estimação dos parâmetros de distorções radiais. Este processo é executado somente uma vez por câmera. Quando a câmera está devidamente calibrada, pode-se salvar os parâmetros e utilizá-los posteriormente para correção automatizada das fotos.

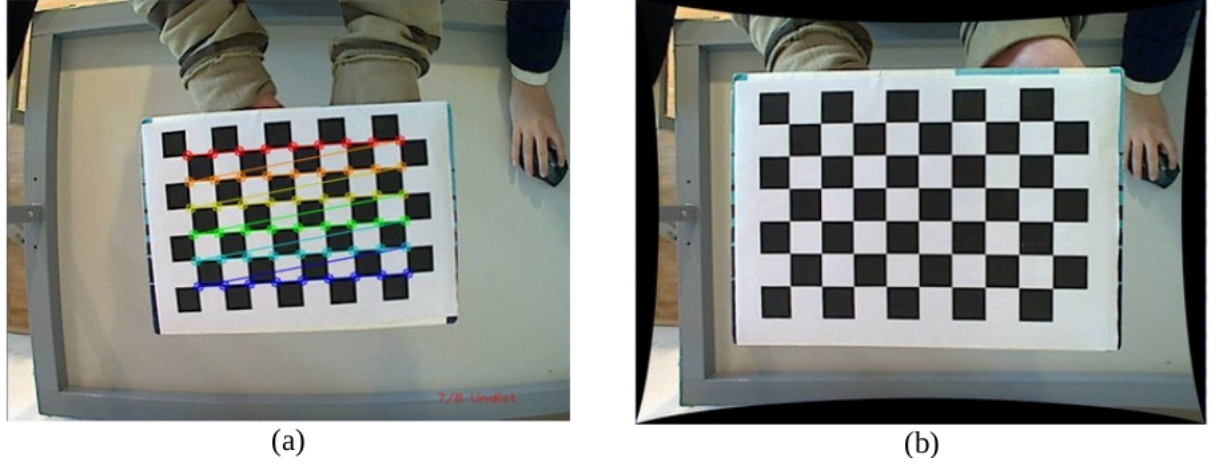


Figura 15 – Antes e Depois do processo de calibração

Repare nas bordas da moldura metálica na imagem 15.a e na 15.b. Percebe-se que na (b) esta região está reta, ao passo que na (a) ela se encontra convexa tal qual a figura 14, impossibilitando relações de proporção com a dimensão real do objeto. É importante notar que após o processo de correção do efeito radial, normalmente cortam-se as bordas da imagem, para que a mesma não fique com a moldura preta oriunda da correção.

O modelo de calibração utilizado no OpenCV utiliza o seguinte modelamento matemático para correção radial:

$$x_{\text{corrigido}} = x(1 + k_1.r^2 + k_2.r^4 + k_3.r^6) \quad (2.2)$$

$$y_{\text{corrigido}} = y(1 + k_1.r^2 + k_2.r^4 + k_3.r^6) \quad (2.3)$$

Para correção tangencial, utiliza-se o seguinte modelo:

$$x_{\text{corrigido}} = x + [2.p_1.x.y + p_2(r^2 + 2.x^2)] \quad (2.4)$$

$$y_{\text{corrigido}} = y + [p_1(r^2 + 2.y^2) + 2.p_2.x.y] \quad (2.5)$$

Matematicamente, o processo de calibração consiste em determinar duas matrizes: distorção e câmera. A matriz de distorção é dada por:

$$Distor_{coeficientes} = \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & p_1 & p_2 & k_3 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

E a matriz da câmera é a matriz de transformação entre o sistema de coordenadas da imagem e o sistema de coordenadas real.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Para determinar essas duas matrizes, efetuam-se diversas medições de distância reais do objeto a ser medido e a sua respectiva representação na imagem. Estes processos podem variar de acordo com o método adotado e fogem do escopo deste trabalho.

Na documentação do OpenCV (DOC. OPENCV 2.8, 2014) há um exemplo que permite a calibração automática da câmera, imprimindo uma textura específica e capturando algumas imagens com a câmera que se deseja calibrar.

2.6 Gestão de Recursos Computacionais

Para compor um mosaico em alta-resolução de uma área de $180 \times 240 m^2$ (4.32ha) voando a 45m de altitude é preciso obter diversas fotos, que após serem aglutinadas, darão origem a uma imagem de 22528×21504 pixels de resolução. Ou seja, o mosaico obtido tem ao todo, 484.442.112 pixels, o que equivale a quase 237 imagens em *Full HD* (1920×1080) concatenadas.

Supondo que cada pixel seja representado por 3 *bytes* (um para cada componente RGB associada ao pixel), é possível observar que essa imagem necessita de aproximadamente 1.5GB de memória para ser aberta. Durante o processamento desta imagem, muitas vezes é preciso fazer cópias, armazenar sub-regiões e etc, o que eleva o consumo de RAM a um valor muito superior a essa estimativa inicial. Somado a isto, deve-se atentar também ao fato que o computador que efetua o processamento utiliza parte da memória para manter recursos básicos do sistema e outros processos, e que, portanto, nem toda memória RAM da máquina estará disponível para ser utilizada somente por essa aplicação.

É importante ressaltar que os valores acima correspondem a uma área de 4.32ha, ou seja, para uma propriedade de 100ha seria necessário aproximadamente 23 vezes os valores anteriores. O que conduziria a pelo menos 34.5GB de memória RAM para apenas carregar a imagem.

Sabe-se que em sistemas operacionais modernos (Windows, Linux, Mac OS, FreeBSD e outros) o total de memória disponível é a soma da memória física (*hardware* real) com a memória virtual (arquivo de paginação ou partição *swap*, geralmente limitados pela capacidade do disco rígido). Esta última, possui acesso muito mais lento que a anterior, devido à sua tecnologia de fabricação. Atualmente os computadores para uso doméstico costumam ter memória RAM entre 4GB a 16GB.

Infelizmente, existem outras complicações além do espaço total disponível para armazenamento do mosaico em memória.

No caso da biblioteca OpenCV, utilizada neste trabalho, o objeto base provido para armazenar e manusear uma imagem (Mat), necessita de um espaço contínuo na memória que seja capaz de acomodar os pixels e outras informações. Isto dificulta ainda mais o carregamento da imagem, pois caso a memória esteja fragmentada (mesmo que pouco) não será possível carregá-la.

Há também a possibilidade de estouro de variáveis (quando se tenta armazenar uma informação que necessita de um espaço superior a quantidade de bits oferecida pelo tipo de variável) em algumas funções básicas da biblioteca, que pode levar a falhas quase impossíveis de serem rastreadas e corrigidas.

A função `area()` é utilizada por várias outras funções, como por exemplo a função

`clone()`, que faz uso do seu retorno. Supondo que o mosaico a ser processado é de uma área de 100ha, mapeada nas mesmas condições do exemplo do primeiro parágrafo, a função `area()` retornaria um valor exageradamente alto e fora dos padrões de imagens "convencionais". Esse valor é, inclusive, superior a $2^{31} - 1$, que é o limite positivo de uma variável `int` (com sinal), que normalmente poderia ser utilizada sem maiores preocupações para esta tarefa. Caso a função `area()` fosse chamada, o valor de retorno seria estourado por não acomodar o tamanho do resultado e induziria uma série de erros em cascata.

Para contornar os problemas citados anteriormente, utilizou-se o seguinte conjunto de estratégias:

- Fatiar a imagem no momento da composição por meio do *software* utilizado para gerar o mosaico: Ao invés de exportar uma única imagem com resolução elevada e tentar carregá-la posteriormente de uma só vez, fatia-se a imagem em blocos de tamanho fixo (1024x1024). Essa abordagem diminui drasticamente a limitação da continuidade da memória. Porém, inclui uma dificuldade extra que é a reimplementação de diversas funções básicas que devem passar a levar em consideração o fatiamento.
- Oferecer ao usuário a possibilidade de carregar o mosaico na memória ou de buscar no disco a cada acesso a imagem: Esta opção permite que ao invés de carregar a imagem na memória, grande parte da visualização e processamento seja feita acessando os arquivos no disco. Torna a aplicação "*disk bound*", ou seja, maior parte da execução seja em virtude do acesso ao disco;
- Partir do pressuposto que na grande maioria do tempo não se está interessado em inspecionar toda a área abrangida pelo mosaico com o mesmo nível de detalhe: Esta simplificação permite que se carregue na tela somente o trecho que se está interessado em visualizar. Melhorando a performance e a gestão do uso de recursos computacionais.

2.7 Algoritmo de segmentação no espaço de cores

Quando se dispõe de uma fotografia aérea de uma plantação, pode-se tirar várias informações relevantes da mesma. Quando a imagem está na banda do espectro visível (ou seja, foi tirada com câmeras convencionais) é possível identificar problemas que dificilmente poderiam ser diagnosticados numa inspeção visual em solo.

Um procedimento similar pode ser realizado sobre imagens obtidas com câmeras multiespectrais, mas diferentemente das câmeras convencionais (que só capturam informação visual) é possível identificar características mais específicas da plantação, como por

exemplo absorção de nutrientes (JÚNIOR; PINTO,). Contudo, essas câmeras possuem valor restritivo e fogem do escopo deste trabalho.

Muitas doenças apresentam como sintoma mudança na coloração do indivíduo, como pode ser visto na Figura 16. Pelo fato de a percepção visual humana ter característica diferencial, ou seja, não dispor de um referencial absoluto, esse tipo de análise em campo é prejudicada.

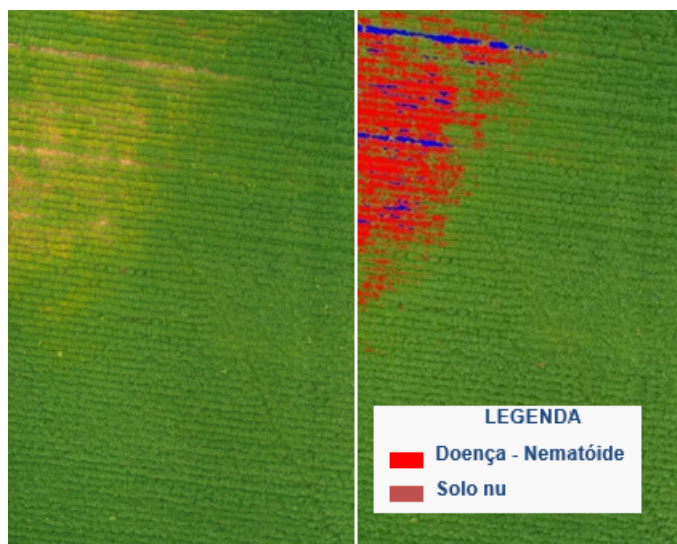


Figura 16 – Exemplo de doença que pode ser identificada a partir de uma imagem aérea

Como a imagem é georreferenciada, pode-se relacionar a marcação visual gerada pelo algoritmo de processamento de imagem com o modelo de geolocalização. Isso permite o ataque ao foco da doença com muito mais acurácia e, portanto, economia de recursos.

Para facilitar a interpretação das cores efetua-se inicialmente a conversão do espaço de representação dos pixels de BGR (*Blue Green Red*) para HSL (*Hue, Saturation and Lightness*).

A mudança de BGR para HSL é atraente pela existência de uma componente exclusiva para Cor (Tonalidade). Isto significa que nesta componente, cada cor possui um valor associado. Nesse novo espaço de cor a interpretação dos valores a serem segmentados se torna mais natural e fácil de ser compreendida e portanto, facilita o entendimento do usuário que for utilizar a ferramenta.

Com o espaço de cores já convertido, gera-se o histograma para a área selecionada pelo usuário e identifica-se o intervalo de tonalidades onde está a maioria da informação. Normalmente, a imagem do padrão selecionado possui a maioria dos pixels na cor de interesse, mas ainda assim é possível que haja outras cores que devem ser desprezadas. Para que a seleção do intervalo retorne bons valores o algoritmo da Figura 17 foi utilizado sobre o histograma da componente de cor.

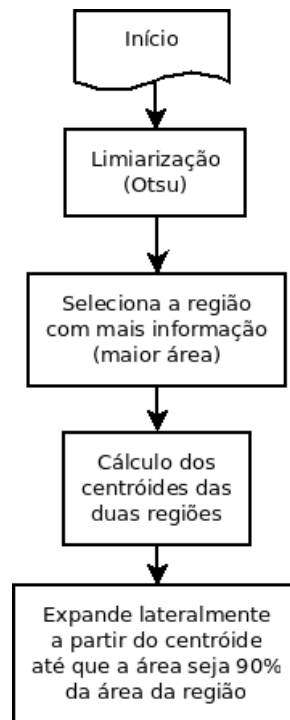


Figura 17 – Fluxograma com a representação do algoritmo para definição de limiar

De posse dos limiares inferiores e superiores é possível binarizar cada um dos canais gerando máscaras. Por fim, efetua-se uma operação lógica do tipo *AND* nas três imagens obtidas para compor o mascaramento final. Para tornar a máscara mais precisa para um futuro cálculo de área basta realizar a operação morfológica de fechamento para preencher eventuais lacunas.

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados o conjunto de materiais e métodos adotados no trabalho. Na parte de materiais foram descritos os componentes utilizados para a concepção do *multirotor*, softwares que compõem o fluxo de obtenção do mosaico e as tecnologias utilizadas para o desenvolvimento do software para processamento posterior.

3.1 Materiais

3.1.1 Aeronave

A parte elétrica do octocóptero tem os seguintes componentes: oito motores elétricos do tipo *brushless*, duas baterias do tipo LIPO e barramento elétrico (um positivo e outro negativo, onde as cargas do sistema são conectadas).

Já a parte eletrônica divide-se em: placa controladora (Pixhawk) e derivados, oito controladores eletrônicos de velocidade, rádio receptor, transmissor de vídeo, conversor HDMI, controladora de gimbal e *Shutter* (dispositivo responsável por fazer o disparo da foto via infravermelho).

Serão abordados a seguir alguns componentes do octocóptero e as razões pelas quais eles foram escolhidos.

Para este projeto, escolheu-se o *frame* (carcaça da aeronave) TAROT IRONMAN 1000 feito em carbono que pode ser visto na Figura 18.

Escolheu-se motores Dualsky XM5010TE-11MR de baixa rotação (3200 RPM/V) que garantem maior torque e estabilidade a aeronave. O motor utilizado pode ser visto na figura 19.



Figura 18 – O frame do octocóptero utilizado para a montagem da aeronave.

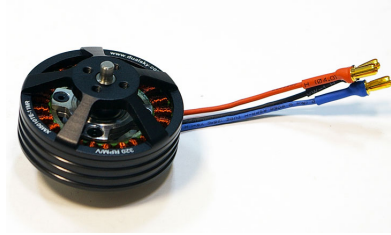


Figura 19 – Motor Dualsky XM5010TE-11MR utilizado no octocóptero

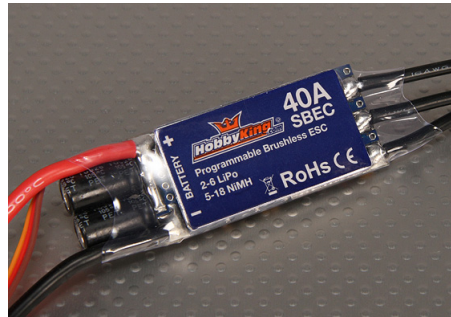


Figura 20 – ESC utilizado na montagem do octocóptero

Para a escolha dos ESCs é necessário analisar três requisitos:

- Frequência: deve ser elevada (geralmente na faixa de 400Hz). Quanto maior a frequência do ESC, mais rápida e precisa será a resposta de funcionamento do motor. Para *multirotors* é preciso um nível de resposta a variações de velocidade elevado, isso dá maior agilidade e confiabilidade ao aparelho.
- Corrente nominal: deve ser acima do valor requisitado pelo motor (26A para esta aplicação).
- Tensão de alimentação: deve ser compatível com o que a bateria fornece. Como a bateria selecionada é do tipo LIPO 6s (6 células), então é preciso escolher um ESC que opere na mesma tensão que ela fornece em seus terminais.

O ESC escolhido para essa aplicação (que atende aos requisitos mencionados acima) é o 40A BlueSeries da HobbyKing que pode ser visto da figura 20.

As hélices usadas para esse projeto foram as hélices DJI 1555 recomendadas pelo fabricante do motor. As hélices escolhidas são mostradas na figura 21. Elas garantem ao motor o torque necessário para a aplicação.

Já a placa controladora escolhida é a *Pixhawk* (sucessora da *Ardupilot*). Essa placa além de ser open-source, tem a capacidade de fazer missão de forma autônoma. Essa função é crucial para este projeto, pois a precisão nos locais onde se deve tirar fotos é determinante para esta aplicação e jamais poderia ser feita de forma manual.



Figura 21 – Hélices utilizadas na montagem do octocóptero

Em comparação com a placa APM 2.6 (sua antecessora), a Pixhawk possui diversas vantagens:

- Poder de processamento maior.
- Possibilidade de salvar as missões em memória não-volátil (Cartão SD).
- O limite de pontos na geração do waypoint é maior.

Abaixo, as características técnicas da controladora de voo:

- **Microprocessador:** STM32F427 Cortex M4 core com FPU (32 bits).
- **Sensores:** Giroscópio ST Micro L3GD20 de três eixos (16 bits); Acelerômetro e Magnetômetro ST Micro LSM303D de três eixos (14 bits); Acelerômetro/Giroscópio Invensense MPU 6000 de três eixos e o barômetro MEAS MS5611. Estes sensores (muitas vezes redundantes) tornam o equipamento mais preciso e estável o suficiente para a missão em modo autônomo.
- **Interfaces:** 5x Portas Seriais, Spektrum DSM / DSM2 / DSM-Xó Satellite, Futaba S.BUSó (entrada e saída), PPM, entrada RSSI (PWM ou tensão), I2C, SPI, conversores analógicos/digitais de 3.3 e 6.6V e porta micro USB externa.

O gimbal selecionado (TAROT 5D2) possui estabilização nos três eixos e pode ser visto na Figura 6. Esta estabilização é essencial para a captura de fotos de qualidade (sem vultos ou borrões oriundos de movimentos bruscos da aeronave).

3.1.2 Softwares

Como software para Estação de Controle em Solo (CGS) utilizou-se o Mission Planner por ser o software sugerido pelo fabricante da placa controladora. O Mission

Planner também foi utilizado para cruzar as informações do log do voo com as imagens tiradas durante a missão.

O aplicativo Agisoft foi utilizado para montagem do mosaico a partir das imagens georreferenciadas pelo Mission Planner.

Para o programa de processamento do mosaico, optou-se pelo desenvolvimento em C/C++ por possibilitar a utilização de recursos do sistema operacional, pela capacidade de executar o binário do aplicativo sem necessidade de instalar ferramentas pagas de terceiros e pela vasta gama de bibliotecas que podem ser importadas para realizar funções básicas.

Dentre as bibliotecas utilizadas no projeto, pode-se citar: QT (construção da interface gráfica com o usuário), GDAL (georreferenciamento), OpenCV (manipulação, exibição e algoritmos de processamento de imagens) e GNUPlot (geração de gráficos).

3.2 Métodos

Nesta seção será mostrado como foi o planejamento de voo das áreas mapeadas, os parâmetros e as técnicas utilizadas para a obtenção das fotos.

Antes de iniciar o voo é importante efetuar a verificação dos sistemas da aeronave para se assegurar de que a aeronave está pronta. Ainda em solo é crucial que a equipe faça a análise das cargas das baterias para assegurar que elas estão carregadas, verificar se o ambiente de decolagem está livre de obstáculos, tais como fiações aérea, postes, vegetação, entre outros, permitindo assim a perfeita decolagem e pouso do equipamento.

As etapas de voo usando o *multirotor* octocoptero são mostradas na figura 22.

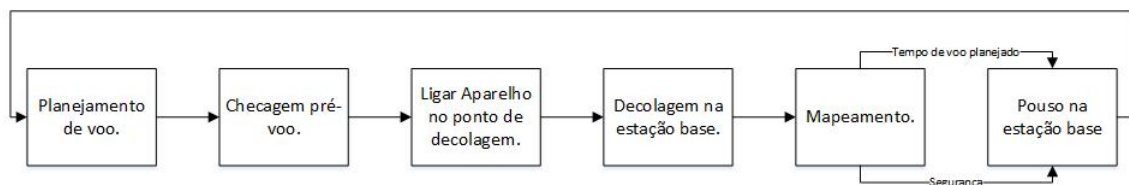


Figura 22 – Etapas de voo de mapeamento *multirotor* octocoptero.

Se algum imprevisto acontecer tal como bateria fraca ou perda do sinal do rádio controle, o *multirotor* irá retornar e pousar no mesmo local onde decolou. Todos os mapeamentos foram feitos próximo as 11 horas para minimizar a sombra dos objetos.

3.2.1 Áreas mapeadas

3.2.1.1 Campus UnB-Gama

A área mapeada compreende o Campus Gama da Universidade de Brasília, um terreno localizado na entrada da cidade do Gama no Distrito Federal. O Gama está a aproximadamente 34,5 quilômetros do centro de Brasília e a área mapeada apresenta 47028 metros quadrados, o que equivale a 4,70 Hectares. Esta área pode ser vista na figura 23.

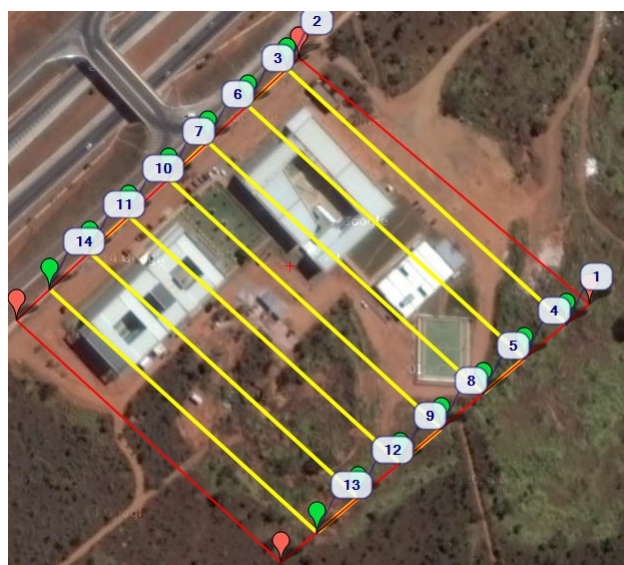


Figura 23 – Área do Campus UnB-Gama delimitada pelo espaço a ser mapeado junto com o plano de voo da missão.

3.2.1.2 Chácara - Área Rural

Esta área mapeada compreende uma chácara localizada em Vicente Pires/DF. A região administrativa de Vicente Pires é uma região de condomínios e chácaras que está localizada entre Brasília/DF e Taguatinga/DF. A área mapeada apresenta 48071 metros quadrados, o que equivale a 4,80 Hectares conforme a figura 24.



Figura 24 – Área da chácara mapeada em Vicente Pires/DF e o plano de voo da missão.

3.2.1.3 Construção Civil

A área mapeada compreende uma construção civil localizada na Asa Norte/DF. Região localizada no centro de Brasília. A área mapeada apresenta 32808 metros quadrados, o que equivale a 3,28 Hectares. Essa área pode ser vista na figura 25.



Figura 25 – Área de construção civil em Asa Norte/DF mapeada utilizando equipamento *multirotor* octocóptero junto com o plano de voo da missão.

3.2.1.4 Pré plantação

Esta área mapeada é uma pré plantação de milho localizada em Planaltina (entorno do Distrito Federal). Possui área total de 61213 metros quadrados, o que equivale a 6,12 Hectares. Esta área pode ser vista pelo polígono na Figura 26.



Figura 26 – Área de pré plantação de milho localizada no entorno de Brasília junto com o planejamento de voo da missão.

3.2.2 Planejamento das missões

3.2.2.1 Campus UnB-Gama

A Tabela 2 possui as informações pertinentes ao mapeamento da faculdade UnB-Gama feito em agosto de 2014. A delimitação da área implica em um tempo de voo inferior ao máximo que a aeronave suporta e os parâmetros de *overlap* e *sidelap* estão dentro dos valores recomendados pela bibliografia para um bom resultado. A altitude foi de 45 metros o que leva a uma resolução estimada em 1,10 cm/pix. A missão foi constituída por 7 faixas de voo e 140 fotos tiradas durante todo o processo de mapeamento.

Parâmetro	Medida
Área (m^2)	42028
Tempo de voo estimado(minutos)	8m33
Número de fotos	142
Overlap (%)	70
Sidelap (%)	60
Câmera	Sony NEX-7
Lente Câmera (mm)	16
Resolução Foto (cm/pix)	1,10
Tempo entre duas fotos (seg)	2,63
Altitude de Voo (m)	45

Tabela 2 – Tabela parâmetros de missão de voo UnB-Gama.

3.2.2.2 Chácara - Área Rural

A missão foi constituída por 8 faixas de voo e 139 fotos tiradas durante todo o processo de mapeamento.

A resolução de foto foi menor que a do voo anterior pois a altitude de voo foi decrescida 5 metros em comparação ao plano de voo da faculdade UnB-Gama e a distância focal foi acrescida 2mm. Com essas mudanças pode se notar observando a equação 2.1 que a resolução no solo irá diminuir.

Já o tempo entre as fotos está dentro do permitido quando se observa os dados fornecidos pelo fabricante da câmera, fazendo com que não se perca nenhuma foto durante o processo de aquisição das imagens.

Parâmetro	Medida
Área (m^2)	48071
Tempo de voo estimado(minutos)	8m14
Número de fotos	139
Overlap (%)	60
Sidelap (%)	50
Câmera	Sony NEX-7
Lente Câmera (mm)	18
Resolução Foto (cm/pix)	0,87
Tempo entre duas fotos (seg)	2,77
Altitude de Voo (m)	40

Tabela 3 – Tabela parâmetros de missão de voo Chacara Vicente Pires/DF.

3.2.2.3 Construção Civil

A missão foi constituída por 9 faixas de voo e 141 fotos tiradas durante todo o processo mapeamento. A resolução de foto foi maior pois a altitude de voo foi acrescida em 5 metros em comparação ao mapeamento do Campus do Gama e a distância focal foi aumentada em 2mm. Com essas mudanças é possível notar o aumento da resolução observando a equação 2.1.

O aumento da altitude de voo foi necessário para compensar a altura de vários elementos retratados em cena. Dentre estes uma estrutura metálica de 40 metros de altura.

Parâmetro	Medida
Área (m^2)	32.808
Tempo de voo estimado(minutos)	6m40
Número de fotos	121
Overlap (%)	80
Sidelap (%)	65
Câmera	Sony NEX-7
Lente Câmera (mm)	18
Resolução Foto (cm/pix)	1,42
Tempo entre duas fotos (seg)	1,73
Altitude de Voo (m)	50

Tabela 4 – Tabela parâmetros de missão de voo para mapeamento de construção civil em Asa Norte/DF.

3.2.2.4 Pré plantação

A missão foi constituída por 6 faixas de voo e 313 fotos tiradas durante todo o processo de mapeamento.

A resolução de foto foi menor pois a altitude de voo foi decrescida em 15 metros em comparação ao mapeamento do Gama/DF e a distância focal foi mantida a mesma. Com essa mudança pode-se notar a diminuição da resolução no solo da foto.

Parâmetro	Medida
Área (m^2)	61213
Tempo de voo estimado(minutos)	15m18
Número de fotos	313
Overlap (%)	80
Sidelap (%)	65
Câmera	Sony NEX-7
Lente Câmera (mm)	16
Resolução Foto (cm/pix)	0,86
Tempo entre duas fotos (seg)	2,01
Altitude de Voo (m)	30

Tabela 5 – Tabela parâmetros de missão de voo para mapeamento de uma pré-plantação de milho localizado próximo a Brasília/DF.

3.2.3 Georreferenciamento

Quando a aeronave retorna ao solo é possível ter acesso ao log de voo que detalha o momento em que alguns eventos aconteceram. Um destes eventos é o disparo da câmera, feito pelo *shutter*. Sabendo o momento em que o shutter foi acionado é possível atribuir a cada imagem registrada uma coordenada geográfica referente ao centro da imagem. Esta coordenada é o registro da posição da aeronave no momento em que a imagem foi capturada.

Para embutir essa informação na imagem utilizou-se o formato GeoTIF. Este formato permite a inserção de tags referentes ao georreferenciamento no próprio arquivo da imagem.

Uma vez que as imagens são marcadas com essas informações de georreferenciamento o software utilizado para construção do mosaico as utilizam para agilizar o processo de costura do mosaico.

Quando o mosaico já está montado é possível fatiá-lo, desta vez em imagens que se conectam sem sobreposição. Esse fatiamento é importante para a gestão de recursos computacionais exercido pelo software que processa a imagem final. Cada fatia possui igualmente uma informação de georreferenciamento em seu centro.

Para manipular essas informações embutidas nas imagens GeoTIF e efetuar as operações com as coordenadas, utilizou-se a biblioteca GDAL *Geospatial Data Abstraction Library* (Biblioteca de abstração de dados geoespaciais) disponível para várias linguagens de programação, inclusive C++ (GDAL, 2014).

Com esta biblioteca é possível extrair a coordenada geográfica do ponto central de uma imagem, além da matriz de transformação (do tipo *affine* - Ver Anexos), utilizada para estimar a coordenada geográfica de outros pixels quaisquer da imagem.

No contexto do programa existem dois tipos de coordenadas geográficas: as radiais e as de projeção.

As coordenadas radiais são dadas em graus, minutos e segundos, e são, portanto, difíceis de operar (pois são dependentes do valor do raio da Terra, que não é perfeitamente uniforme), já as coordenadas de projeção, são expressas diretamente em metros em relação a um ponto específico (que varia de acordo com o sistema de coordenada geográfica) e assim mais fáceis de serem operadas. A transformação entre duas coordenadas geográficas de sistemas distintos (também conhecido como DATUM) também foi implementado por meio da biblioteca GDAL (ARCGIS, 2008).

4 Resultados e Discussão

4.1 Qualidade da imagem

A qualidade final das imagens obtidas neste trabalho impressiona se contrastada com aquela disponível por imageamento satelital. Na Figura 27 é possível ter uma idéia da riqueza de detalhes alcançada.



Figura 27 – A esquerda, exemplo de imagem obtida neste trabalho (Com um terço da resolução máxima). A direita, imagem satelital obtida pelo Google Earth com a maior resolução possível.

4.2 Mosaicos Realizados

Os resultados deste trabalho incluem quatro mosaicos feitos pela equipe. Esta etapa consistiu em georreferenciar e colocar no mosaico as imagens obtidas. O georreferenciamento se deu através do programa *Mission Planner*, e a ortorretificação e geração do mosaico foram feitos através do *software Photoscan Professional* da Agisoft.

Foram realizados quatro mapas para validação do processo. A câmera foi programada para tirar as fotos a cada vez que a placa controladora enviasse o comando para o *shutter* que aciona o sensor via infravermelho e assim dispara a foto.

A posição de cada imagem é calculada com base no registro de voo da aeronave. O octocóptero está equipado com um receptor GPS de navegação com erros espaciais associados. Com isso seria necessário utilizar pontos de controle para alcançar melhor precisão dos mosaicos em relação a sua localização na terra. Neste trabalho, não foram utilizados pontos de controle em solo em nenhum dos mosaicos, o que ocasionou em erros de localização geográfica.

Após georreferenciar, ortorretificar e associar as imagens, é possível extrair a ortofoto final, um relatório com informações sobre o mosaico e o modelo digital de elevação (MDE).

4.2.1 Faculdade UnB-Gama

Esta missão aconteceu em Agosto de 2014. Ao todo foram tiradas e selecionadas 142 fotos para a geração do mosaico ortorretificado. O resultado pode ser visto na Figura 28.



Figura 28 – Mosaico de fotos UnB-Gama

Como pode ser visto na tabela 6 as fotos tiradas tiveram erros significativos que se deram por conta da estimativa errada da diferença de tempo feita pelo *software Mission Planer* da foto tirada pela câmera e a informação de tempo gerado pelo log da placa. Essa diferença é feita para todas as fotos e para minimizar o erro inerente a esta etapa é recomendado que se faça manualmente, e não de forma semi-automatizada pelo software.

Erro X(m)	Erro Y(m)	Erro Z(m)	Erro total(m)
103.198409	89.931539	10.085065	137.256336

Tabela 6 – Erro médio da posição das imagens do mosaico UnB-Gama.

Para se obter bons resultados ao fim do processo é fundamental garantir alto nível de sobreposição das imagens para que mais redundante seja a nuvem de pontos (*pixels*) utilizada para gerar o mosaico.

Conforme pode ser visto na Figura 29, o nível de sobreposição se manteve aceitável ao longo da missão, obtendo níveis acima de 5 durante todo o processo. Houve uma diminuição nas extremidades (como era de se esperar) e sobre os prédios (região de maior elevação).

Para melhorar os resultados nesses casos, seria preciso elevar a altitude do voo para aumentar a sobreposição naquela área.

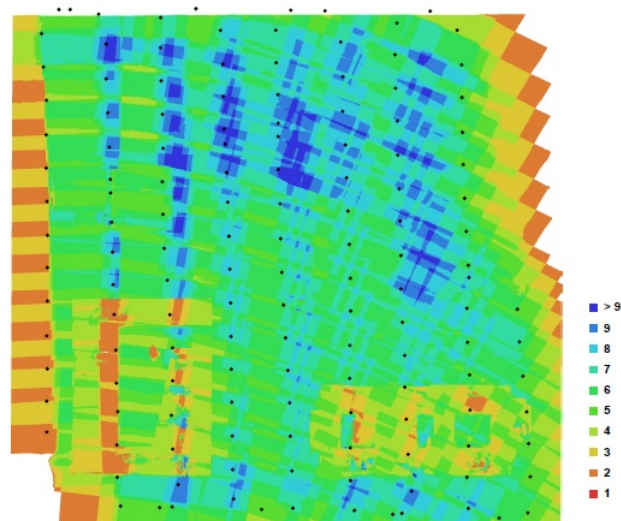


Figura 29 – Posição das imagens coletadas e nível de sobreposição entre elas.

O modelo digital de superfície do mosaico UnB-Gama pode ser visto na figura 30.



Figura 30 – Modelo Digital de Elevação (MDE) do mosaico UnB-Gama.

O mosaico do Gama apresenta excelente qualidade gráfica. Porém, existem etapas do processo que podem ser melhoradas e outras que podem ser incluídas. A inserção de uma etapa de pontos de controle pode ajudar a corrigir alguns erros de localização espacial que foram verificados.

O mosaico obtido possui resolução espacial de 1cm/pixel e apresentou problemas de emenda somente em locais de baixa sobreposição. Como pode ser visto na imagem 31



Figura 31 – Erro de montagem de mosaico pela carência de imagens sobrepostas.

4.2.2 Chácara - Área Rural

Este mapeamento foi realizado em Setembro de 2014. Ao todo foram utilizadas 185 fotos para a geração do mosaico ortorretificado. O mosaico pode ser visto na figura 32.

Para a realização deste trabalho foi preciso refazer o georreferenciamento do mosaico gerado pelo VANT utilizando o programa ArcGis. De posse da informação visual e do

georreferenciamento corrigido, dividiu-se a área total em três porções, a fim de delimitar a área real de cada proprietário do terreno.

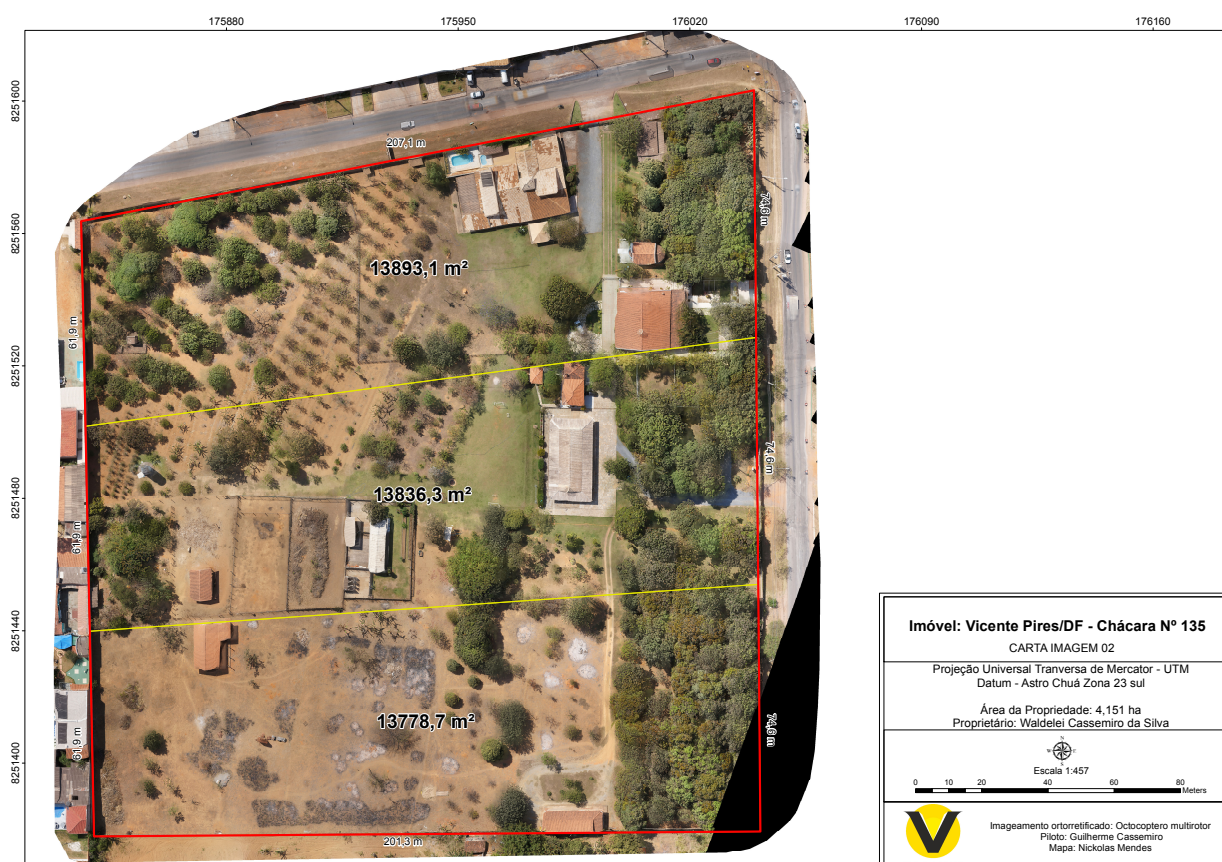


Figura 32 – Divisão de um terreno feito com mosaico aéreo da propriedade rural mapeada pela equipe.

Como pode ser visto na tabela 7 as fotos tiradas tiveram erros significativos. O motivo destes erros foi a estimativa da diferença de tempo feita pelo *software Mission Planner* entre a foto tirada pela câmera e o tempo registrado no log da placa. Para minimizar esse erro é recomendado que se faça este processo manualmente.

Erro X(m)	Erro Y(m)	Erro Z(m)	Erro total(m)
83.041594	90.408432	4.095399	122.826558

Tabela 7 – Erro médio da posição das imagens do mosaico área rural.

É possível notar que as regiões de mais baixa sobreposição estão na parte inferior do mosaico, onde há bastante árvores. Logo, o mapeamento poderia ser feito a uma altitude maior ou com maior sobreposição de imagem a fim de garantir boa sobreposição sobre as árvores que tiveram valores abaixo de três.

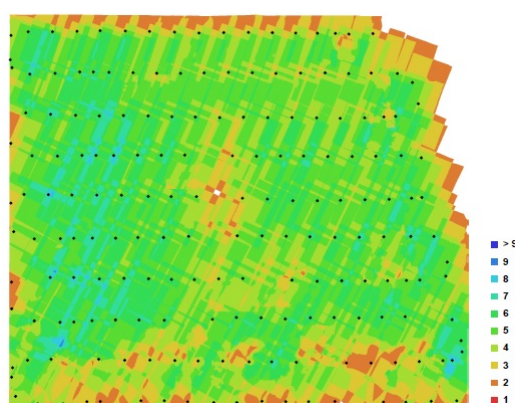


Figura 33 – Posição das imagens coletadas e nível de sobreposição entre elas do mosaico em área rural.

O modelo digital de superfície do mosaico área rural pode ser visto na figura 34.

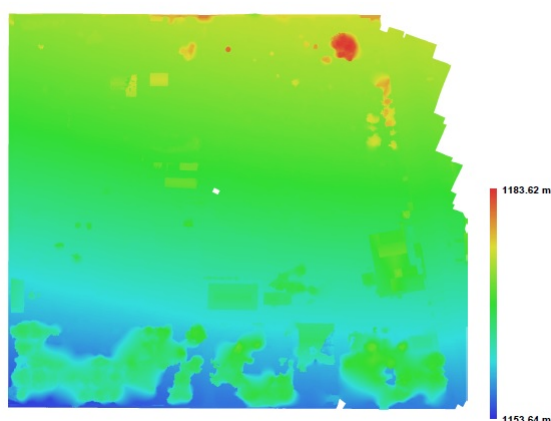


Figura 34 – Modelo Digital de Elevação (MDE) do mosaico área rural.

O mosaico obtido possui resolução espacial de 1cm/pixel e apresentou problemas de emenda de imagem somente em locais de baixa sobreposição.

4.2.3 Construção civil

Este mapeamento foi realizado em Outubro de 2014 e 121 fotos foram tiradas para a geração deste mosaico ortorretificado. O mosaico aéreo desta área pode ser visto na figura 35.



Figura 35 – Mosaico de fotos construção civil

Nesta missão houve erro no cruzamento das informações geográficas do log de vôo com as imagens contidas na câmera. O erro se deu ao atribuir as coordenadas de cada foto antes da montagem do mosaico. Este por sua vez, teve de ser construído apenas com as características visuais da imagem.

Como pode ser visto na figura 36 o nível de sobreposição foi bom durante todo o processo, obtendo níveis acima de 9 durante todo o processo, considerado o ideal para se mapear.

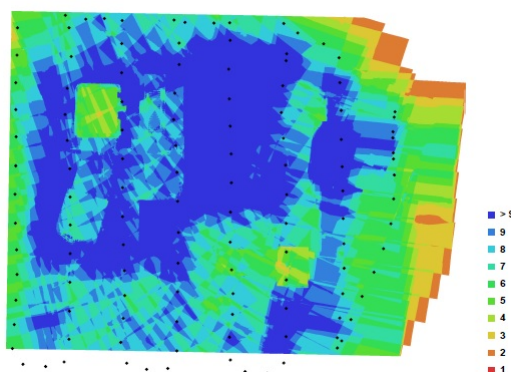


Figura 36 – Posição das imagens coletadas e nível de sobreposição entre elas.

O modelo digital de superfície do mosaico construção civil pode ser visto na figura 37. A resolução deste modelo foi de 34,36 metros considerado um resultado pouco preciso o que torna inviável o uso deste modelo para aplicações praticas. Este erro se deve ao processo de georreferenciamento mencionado anteriormente.

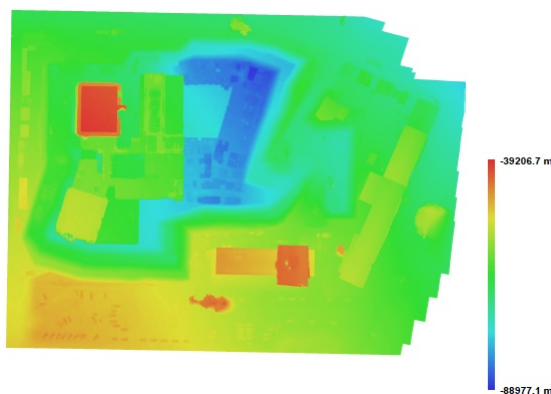


Figura 37 – Modelo Digital de Elevação (MDE) do mosaico construção civil.

O mosaico obtido possui resolução espacial de 1cm/pixel e não apresentou problemas de emenda de imagem por conta da boa sobreposição mantida quase que uniforme durante todo o processo de obtenção de foto. Este mapa, apesar de não ter coerência georreferencial, poderia ser re-georreferenciado em um software a parte como o ArcGIS. Contudo, seria necessário pontos de controle para efetuar o alinhamento e ajuste.

Apesar dos erros geográficos, é possível utilizá-lo para acompanhamento da evolução da obra.

4.2.4 Pré-plantação de milho

Este mapeamento foi realizado em Novembro de 2014. Ao todo foram tiradas e selecionadas 313 fotos para a geração do mosaico ortorretificado. A área total mapeada foi a maior feita em um só voo. O tempo total de voo estimado foi de 15 minutos e 18 segundos. O mosaico de fotos pode ser visto na figura 38.



Figura 38 – Mosaico de fotos de pré plantação de milho

Como pode ser visto na tabela 6 as fotos deste mosaico tiveram erros posicionais bem menores em relação aos outros três citados anteriormente. Neste mapeamento o processo de georreferenciamento da foto dentro do *software Mission Planer* foi feita de forma manual, utilizando uma foto de controle que tem as informações de horário do GPS e o horário da foto tirada pela câmera.

Por meio da diferença entre esse horário e o horário do GPS, foi possível obter a diferença de tempo entre o processo. A foto de controle deste mapeamento foi tirada no mesmo local e hora da foto de controle anterior, caso houvesse sido usado pontos de controle, isso poderia ter aumentado ainda mais a precisão do georreferenciamento.

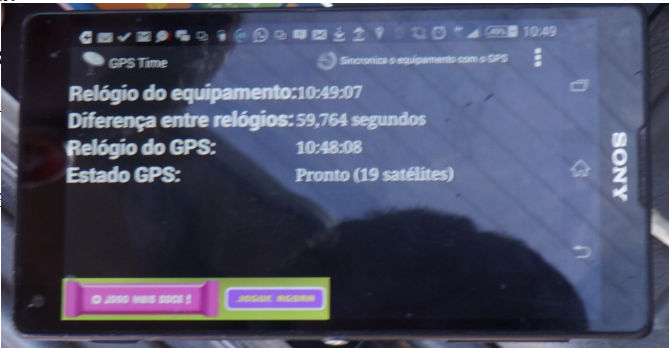


Figura 39 – Foto de controle tirada para se obter a diferença de tempo aonde a foto foi tirada em relação ao horário do GPS

Erro X(m)	Erro Y(m)	Erro Z(m)	Erro total(m)
35.925224	5.748034	4.954978	36.718026

Tabela 8 – Erro médio da posição das imagens do mosaico pré plantação de milho.

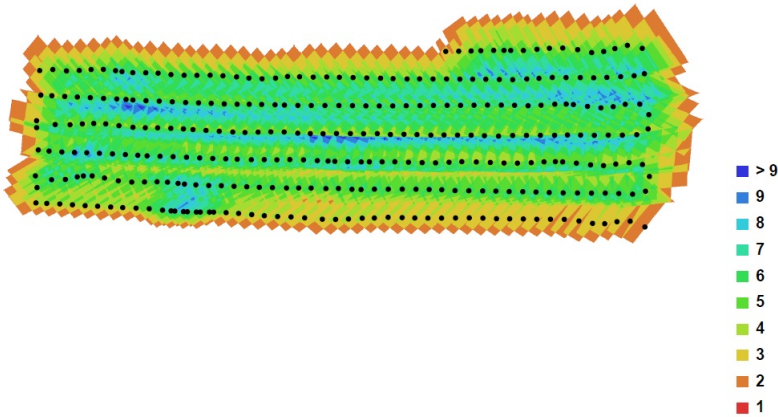


Figura 40 – Posição das imagens coletadas e nível de sobreposição entre elas.

O modelo digital de superfície do mosaico pré plantação de milho pode ser visto da figura 41.

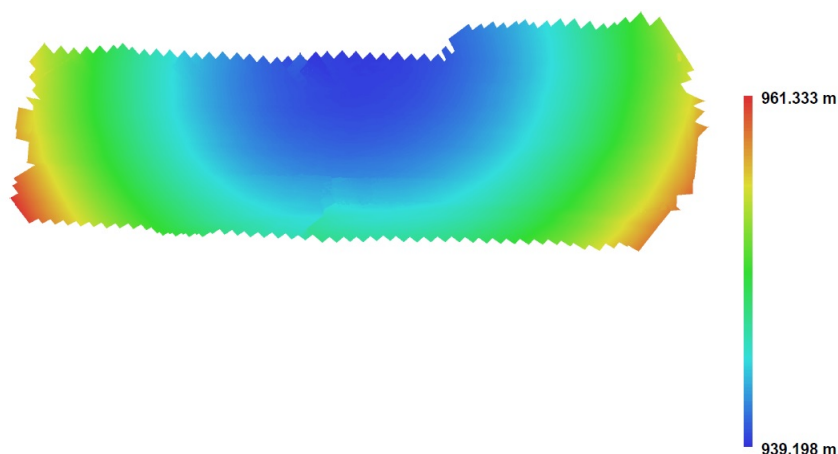


Figura 41 – Modelo Digital de Elevação (MDE) do mosaico pré plantação de milho.

O mosaico da pré plantação de milho apresenta excelente qualidade visual, com precisão de 0.5cm/pixel e sem problemas de sobreposição. Isso porque a altitude do terreno em todo o mosaico se manteve constante. Em imagens agrícolas como esta, é importante que o georreferenciamento esteja ótimo, pois caso o software de montagem do mosaico dependa somente da extração de *features* (Ver Anexo), é muito provável que gere inconsistência por causa da homogeneidade da imagem.

4.3 Software de processamento

De posse dos mosaicos anteriores desenvolveu-se uma aplicação que permite extrair informações relevantes sobre a área mapeada. Essa aplicação em muito se assemelha às aplicações GIS (*Geographic Information System*), onde há uma associação de um arquivo *raster* (arquivo de imagem) com um modelo de localização geográfica que permite vincular a informação visual com a georreferenciada.

Alguns softwares GIS possuem ferramentas que utilizam processamento de imagem para extração de informações. Contudo, essas ferramentas são geralmente de uso genérico e podem não ser tão efetivas para casos mais específicos. As imagens obtidas neste trabalho são de altíssima resolução e, portanto, diferentes das imagens de satélites que se costuma utilizar nesse tipo de software.

Sabendo disso, julgou-se que a criação de uma aplicação para processar as imagens obtidas poderia ser um diferencial, não só por possuir uma implementação voltada para imagens em alta-resolução, mas também pela possibilidade e facilidade de se inserir ferramentas de processamento de imagens mais específicas para cada tipo de aplicação.

4.3.1 Navegação

Conforme descrito no início deste trabalho, carregar o mosaico em alta-resolução e navegar por ele é uma tarefa complicada de ser feita em visualizadores convencionais, onde toda imagem é carregada para a memória.

Na maior parte do tempo, não se está interessado em ver uma enorme parte do mosaico de uma só vez com alto nível de detalhe. A ferramenta de navegação permite carregar somente o trecho de interesse, sendo portanto muito mais atraente do ponto de vista computacional.

Quando se clica sobre o botão da ferramenta, carrega-se uma tela com a miniatura do mosaico. Essa tela possui uma área de seleção vermelha, que corresponde a área que irá ser carregada na tela principal. É possível deslocá-la por meio da movimentação do mouse, e travá-la quando for preciso, apertando o botão do meio do mouse. Essa abordagem permite uma navegação relativamente fluida e um carregamento mais rápido do mosaico. Por meio das teclas *Shift* e *Alt* é possível aumentar e diminuir a área de seleção na miniatura (*Zoom*).



Figura 42 – Ferramenta de Navegação

4.3.2 Medições

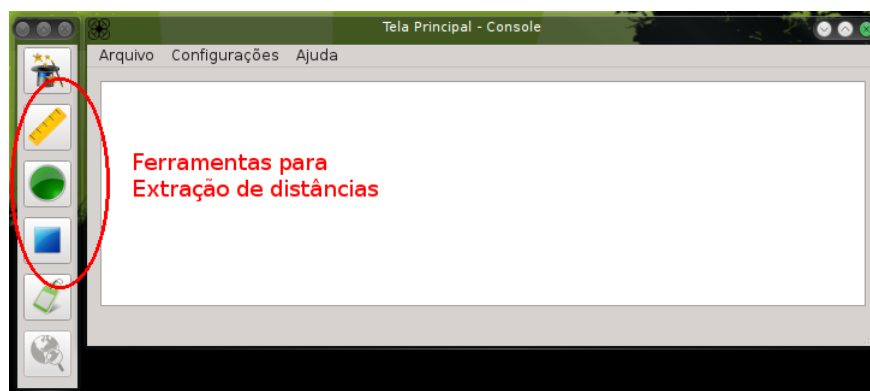


Figura 43 – Ferramentas para cálculo de distâncias e áreas da região mapeada

Com a ferramenta desenvolvida para processar o mosaico é possível calcular distâncias e áreas da região mapeada por meio das seguintes ferramentas:

A ferramenta régua, exibe a distância entre dois pontos selecionáveis. Essa distância é calculada com base nas coordenadas geográficas do tipo projeção de cada ponto escolhido. Com o mesmo princípio, as ferramentas círculo e retângulo possuem comportamento semelhante. O resultado da medida pode ser visto no log da janela principal do programa.

No geral, as ferramentas de medição possuem apelo maior para imagens de ambientes urbanos, onde se deseja medir o comprimento de elementos retratados na captura.



Figura 44 – Exemplo de medição com a ferramenta régua - A linha em azul é traçada em tempo real pela ferramenta para facilitar a escolha do ponto

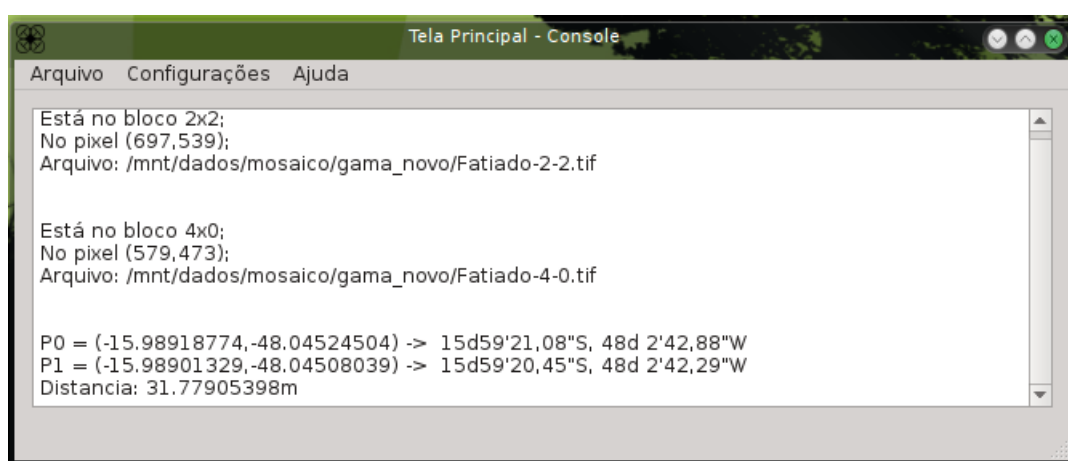


Figura 45 – Resultado da medição exibido no console, com outras informações relevantes

De forma similar, selecionando o ponto central e em seguida um ponto qualquer que delimita o raio, é possível medir a área de circunferências, conforme a Figura 46.

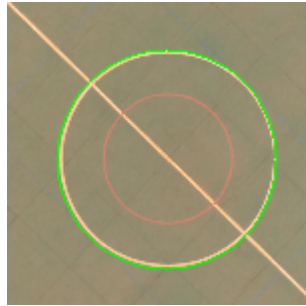


Figura 46 – Medição da área do círculo central da quadra do Campus de Engenharia UnB Gama - Aproximadamente $28m^2$

Os valores encontrados para as medições acima foram confrontados com os resultados obtidos por meio dos softwares da Google (Google Maps e Google Earth) e houve correspondência.

4.3.3 Georreferenciamento

A ferramenta *Tag*, indicada por uma etiqueta logo abaixo do círculo na Figura 43 retorna a coordenada de um pixel qualquer que o usuário queira saber. Essa ferramenta faz uso direto das informações de georreferenciamento existentes nas fatias do mosaico.

É importante ressaltar que a precisão nesta informação depende de vários aspectos: qualidade do módulo GPS utilizado na aeronave, calibração do mesmo, reparos em eventuais deslocamentos no georreferenciamento das imagens tiradas pelo drone e precisão na escolha do pixel.

A coordenada é impressa no log da tela principal em latitude e longitude. No geral, os resultados apresentados pelo software exibiram divergência dos valores reais. Contudo, essas discrepâncias são oriundas das próprias imagens que foram usadas para compor o mosaico e, portanto, estão relacionadas a falhas anteriores no processo.

4.3.4 Segmentação por cores

A primeira ferramenta que pode ser vista na imagem 43 detecta padrões de cores. Uma vez selecionada, é possível navegar pelo mosaico e fazer seleções de trechos com cores específicas que se deseja identificar. Em seguida, o software executa uma rotina que varre todas as fatias do mosaico gerando uma máscara onde houver correspondência das cores selecionadas nas amostras e no mosaico.

Essa ferramenta é mais apropriada para aplicações em imagens agrícolas (homogêneas), pois em imagens urbanas, é provável que exista outros elementos com a mesma cor, o que pode induzir o algoritmo de geração da máscara a incluir áreas que não deveriam.

Para poder identificar regiões do mosaico que seguem um padrão específico, primeiro é preciso selecionar uma região da imagem que apresenta as características visuais compatíveis com a marcação que se deseja fazer. Por exemplo, dada a Figura 47, deseja-se que o algoritmo identifique a região queimada de forma autônoma.



Figura 47 – Imagem aérea captada na missão feita sobre o Campus UnB Gama

Como região de referência, selecionou-se o trecho indicado na Figura 48 que corresponde a uma região que apresenta vestígios de queimadas:



Figura 48 – Padrão da queimada selecionado

Em seguida, aplicando o algoritmo proposto na fundamentação teórica deste trabalho é possível encontrar os histogramas das Figuras 49, 50 e 51.

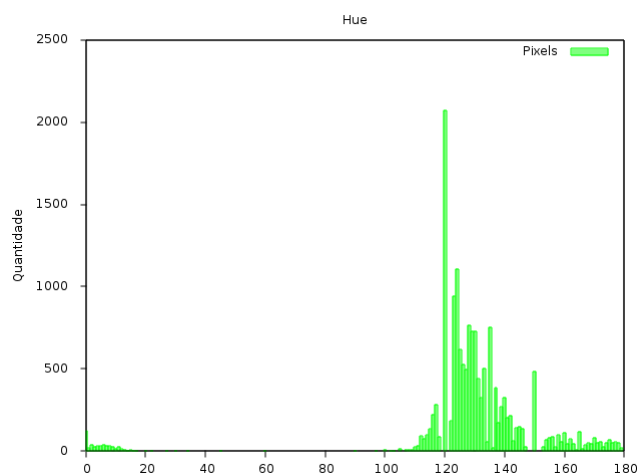


Figura 49 – Histograma da componente Cor

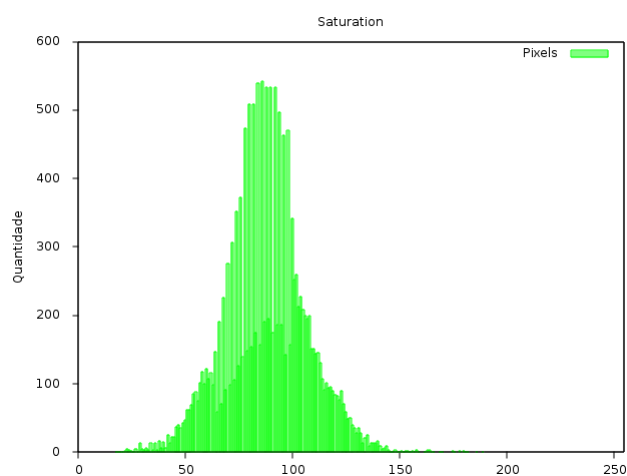


Figura 50 – Histograma da componente Saturação

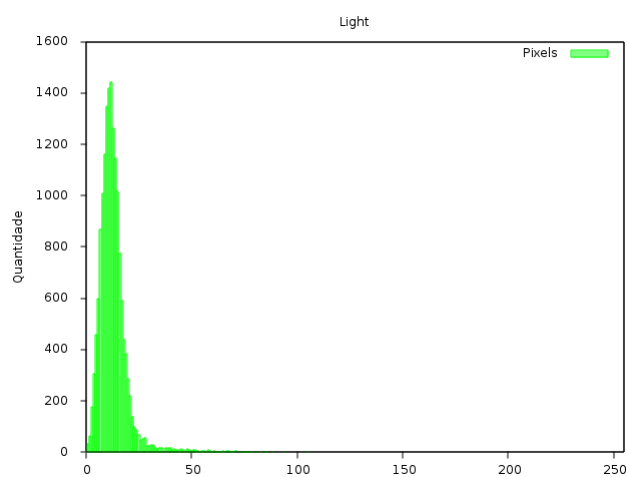


Figura 51 – Histograma da componente Iluminação

Os valores para os limiares de cada canal constam na Tabela 9.

Canal	Inferior	Superior
Cor	97	165
Saturação	13	157
Iluminação	0	53

Tabela 9 – Limiares encontrados para a segmentação.

Na Figura 52 é possível visualizar a máscara que identifica a região queimada da Figura 47.

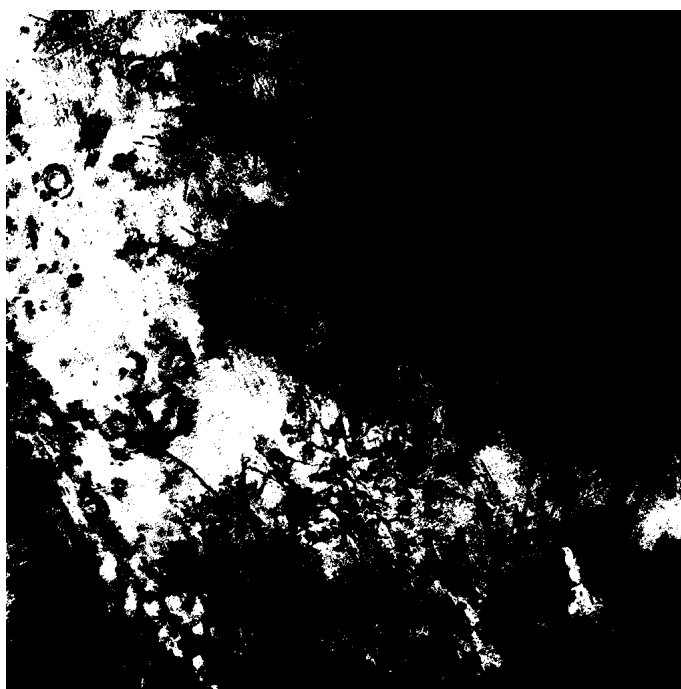


Figura 52 – Máscara da região segmentada

Por fim, a Figura 53 mostra o resultado da segmentação na imagem original já com a operação morfológica aplicada sobre a máscara.

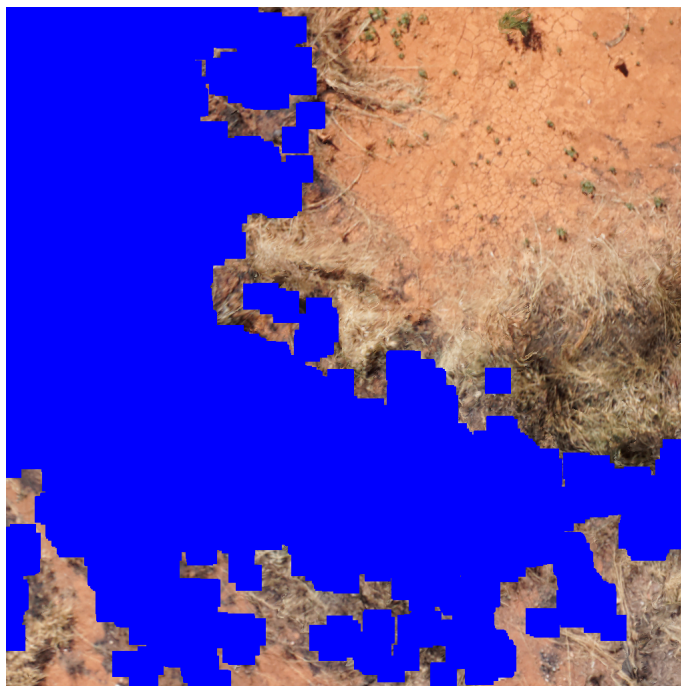


Figura 53 – Resultado final da identificação

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

O uso dos atuais métodos de imageamento aéreo tais como aviões tripulados e sensores de alto custo não serão substituídos pelos VANTs de pequeno porte, porém, existe uma lacuna deixada pelos métodos tradicionais e os VANTs são excelentes para o preenchimento destes cenários. O baixo custo de aquisição do equipamento e de operação permite a realização do imageamento aéreo em pequenas áreas.

Ainda que se consiga fazer o mosaico de imagens utilizando este *multirotor* do tipo octocóptero, pode-se perceber que a solução adotada não tem o tempo de voo apropriado para atender a extensão de 100 hectares, tornando-se necessário uma aeronave que possa voar mais tempo ou a divisão de uma missão em sub-missões.

Os resultados apresentados demonstram qualidade de resolução espacial jamais alcançadas pelos métodos tradicionais. Sendo assim, o uso de VANTs para o imageamento aéreo estabelece novos padrões de qualidade em relação à resolução espacial.

É possível notar que é necessário conhecimento técnico apurado para conseguir levantamentos com exatidão geográfica e boa resolução espacial. O equipamento de voo tem que estar bem calibrado a fim de manter as condições necessárias para aquisição das imagens e o uso de pontos de controle se torna imprescindível para se obter maior exatidão geográfica.

Além disso, pode-se incluir mais uma etapa de ajuste no georreferenciamento do software desenvolvido, para tentar se aproximar ainda mais do resultado ideal. Neste trabalho não se utilizou destas técnicas, o que resultou em mosaicos com exatidão geográfica abaixo do desejado.

Quanto à ferramenta desenvolvida neste trabalho para extração de informações do mosaico, pode-se dizer que os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que foi possível por exemplo, extrair medições reais e confrontá-las com resultados de ferramentas já consolidadas. Além disso, a ferramenta desenvolvida apresenta bom nível de usabilidade e pode absorver facilmente novas funcionalidades já que as funções básicas de manipulação já estão prontas.

Os trabalhos que podem ser realizados usando os VANTs e os multirotores são imensos e com o amadurecimento desse processo de aquisição de imagens pode-se gerar diversos estudos com a finalidade de melhorar a produtividade dentro de propriedades agrícolas ou urbanas.

Com o domínio deste processo a equipe pretende manter os estudos relacionados a este tema e futuramente usar a solução amadurecida para a abertura de uma empresa que

trabalhe nesse ramo de mercado, atuando nas diversas regiões do país onde se necessite deste tipo de serviço.

6 Anexos

6.1 Algoritmo para formação do mosaico

Abaixo um esclarecimento mais detalhado das etapas envolvidas no processo de formação do mosaico. Durante o desenvolvimento do projeto, a equipe optou por utilizar um software que se encontrava disponível e que descreve todas as etapas a seguir.

6.1.1 Visão geral do processo

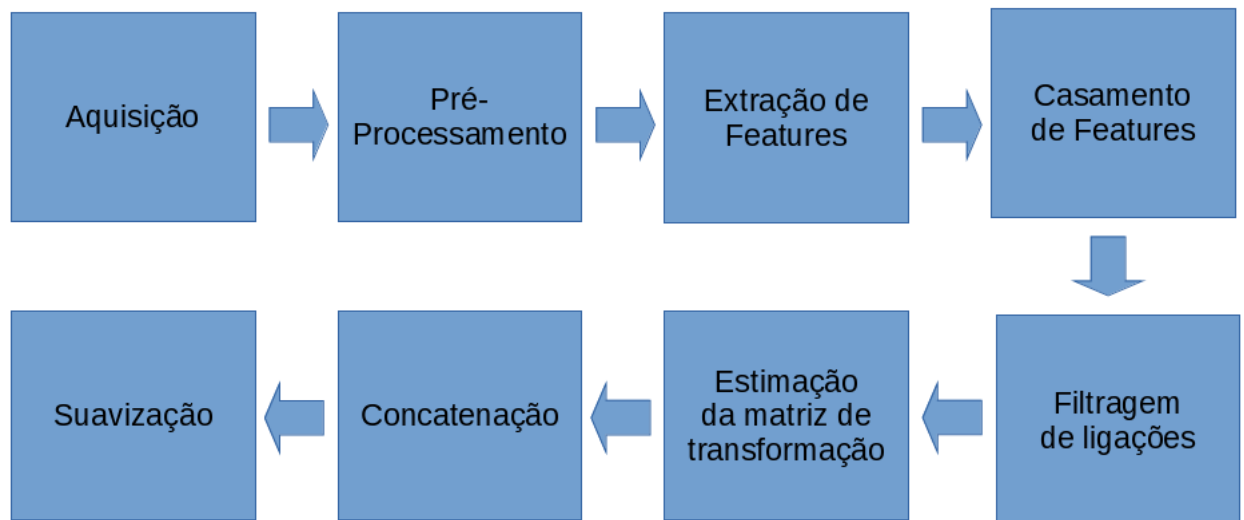


Figura 54 – Processo de construção do mosaico

- **Aquisição:** Captura da imagem por meio da câmera acoplada à aeronave e coleta de dados de telemetria para auxiliar as etapas posteriores.
- **Pré-processamento:** Correção das distorções geométricas advindas das imperfeições no sensor de captura (câmera).
- **Extração de Features:** Levantamento de características singulares na imagem.
- **Casamento de Features:** Ligação de características similares entre duas imagens adjacentes capturadas.
- **Filtragem de ligações:** Seleção de ligações úteis dentre as levantadas na etapa anterior.
- **Estimação da matriz de transformação:** Cálculo da matriz de transformação que conduz uma imagem adjacente a posição correta de sobreposição com a imagem anterior.

- **Concatenação:** Estratégia para sobreposição continuada de imagens.
- **Suavização:** Tratamento dos problemas advindos da concatenação de imagens.

6.1.2 Extração de características

Uma das etapas mais importantes de todo o processo de montagem do mosaico em alta-resolução é a detecção de características (features). Nesta etapa, identifica-se pontos-chaves na imagem para que em etapas posteriores possa-se estimar a maneira pela qual duas imagens adjacentes se interconectam. Essa etapa deve ser o mais insensível a transformações possível. Quer dizer, o algoritmo de detecção deve ser capaz de encontrar características comuns entre duas imagens mesmo que uma das imagens tenha sofrido uma transformação do tipo rotação (oriunda da rotação da aeronave) e escala (proveniente de variações de altitude). Logo, o algoritmo utilizado tem que ser invariante em rotação e escala.



Figura 55 – Exemplo da detecção de features

Cruzando os algoritmos mais empregados para detecção de características e as implementações providas pela biblioteca OpenCV, selecionou-se os algoritmos abaixo para análise.

- ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) (RUBLEE, 2011).
- SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) (LOWE, 2004).
- SURF (Speeded-Up Robust Features) (RAY, 2008).

Os algoritmos recebem como entrada uma imagem em escala de cinza e retornam um conjunto de informações que identificam as características da imagem invariantes à rotação e escala. Cada característica possui os seguintes parâmetros: uma coordenada do pixel na imagem e um vetor oriundo dos pixels adjacentes, que identificam uma característica como única.

Detalhes da implementação de cada um destes algoritmos podem ser encontrados nas referências. Neste trabalho busca-se apenas a aplicação e comparação dos métodos acima.

6.1.3 Matching

De posse de duas imagens adjacentes e suas respectivas características obtidas na etapa anterior, é necessário efetuar o casamento de singularidades (Matching).

Nesta etapa dispõe-se inicialmente de duas imagens e duas listas (A e B) contendo as singularidades de cada uma e seus respectivos descritores. No fim, objetiva-se estabelecer uma relação de quais características presentes na primeira imagem também estão presentes na segunda e qual seu respectivo par.

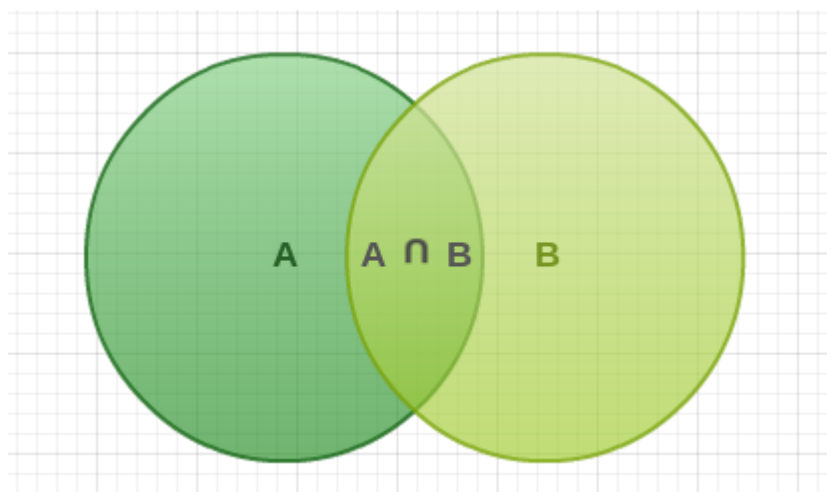


Figura 56 – Detecção de características entre duas imagens

Este casamento é a base para a estratégia de aglutinação de fotos para a costura do mosaico e está intimamente com a estratégia de sobreposição no momento da aquisição das imagens.



Figura 57 – Associação de pares de características em imagens adjacentes

Existem diversos algoritmos para casamento de características. Em sua grande maioria, divergem quanto à estratégia de busca e casamento de descritores entre duas listas. O mais simples efetua o casamento por meio da força bruta, iterando a cada elemento da lista 2 até encontrar o par da feature em análise da lista 1.

Outras variações, partem de suposições iniciais que tendem a acelerar a busca. Por exemplo: se duas features estão próximas na imagem a, é provável que na imagem b elas também estejam próximas, não sendo necessário portanto analisar a lista de destino pela origem. Esse é o princípio de funcionamento do Matcher Nearest Neighbor (Vizinho mais próximo) (MUJA; LOWE, 2009).

6.1.4 Filtragem de matches

Às vezes acontece de pares encontrados serem falsas correspondências, sendo necessária a respectiva eliminação. Essas falsas correspondências podem induzir ao erro na estimação da matriz de transformação (TARALLO, 2013).

Para reduzir a chance de erros, pode-se adotar algumas medidas. A mais simples consiste em efetuar uma análise geométrica das distâncias de cada par, filtrando os matches por meio de um limiar, que limita a seleção dos pares que possuem distância inferior ao especificado. Esse limiar costuma ser dado em função da distância mínima obtida. Exemplo: aceitar somente pares cuja distância é menor que uma vez e meia a distância mínima obtida após o matching.

Contudo, como qualquer outra técnica que dependa de uma escolha subjetiva de um limiar, acaba-se tendo um método passível a exceções, e portanto, pouco robusto. Optou-se portanto em adotar uma estratégia diferente: a verificação cruzada, ou cross-

check.

A ideia consiste em efetuar os matches de A para B e também de B para A, e manter somente as ligações que coexistirem em ambas as direções (KALAL, 2010). Pode-se inclusive, utilizar algoritmos diferentes para cada sentido.

Esta segunda alternativa não depende de um limiar, e minimiza consideravelmente as chances de falha.

6.1.5 Estimação da matriz de transformação

A matriz de transformação concentra em si as diversas operações necessárias para se conduzir os pontos de uma imagem avulsa $P(X,Y)$, ao ponto $P'(X^*,Y^*)$ pertencente ao mosaico. Novamente, como neste trabalho a aquisição das imagens segue um processo bem definido, pode-se fazer algumas simplificações:

- A câmera está voltada para baixo durante toda a etapa de aquisição de forma que o erro é suficientemente pequeno, uma vez que se dispõe de um dispositivo físico para atenuar os efeitos do vento (Ginball).
- A superfície a ser mapeada é aproximadamente plana.

Com base nas considerações acima, pode-se dizer que a construção do mosaico envolve apenas transformadas lineares e bidimensionais. De forma que as transformações que podem ocorrer entre duas imagens são apenas: translação, rotação e mudança de escala. Cada transformação desta está associada a um parâmetro da telemetria: Coordenada GPS, Valor de yaw e altitude.

A matriz de transformação que conduz o ponto $X_o = [x, y]$ até o ponto $X_1 = [x', y']$ possui 6 parâmetros. Cada par de pontos casados fornece 2 equações, sendo necessário portanto, no mínimo três pares de pontos para estimar a matriz de transformação. Esses pares devem fornecer uma relação consistente.

6.1.6 Superposição

A superposição das diversas imagens, uma em cima da outra, pode ser feita por meio da aplicação iterativa das transformações discutidas na seção anterior. Ou seja, caso disponha-se de uma imagem inicial I_o e a sua respectiva imagem adjacente I_1 a matriz T_o conduz I_1 a sobrepor-se a I_o .

No passo seguinte, calcula-se de forma similar, a matriz T_1 que conduz I_2 a sobrepor-se a I_1 . Contudo, como I_1 já havia sofrido uma transformação, deve-se apli-

car essa mesma transformação ao resultado. Obtendo-se portanto uma aplicação iterativa de matrizes de transformação:

$$T_n = A.T_{n-1} \quad (6.1)$$

Onde A corresponde a matriz estimada pelas técnicas da seção anterior e T_{n-1} é a matriz de transformação das imagens anteriores.

6.1.7 Suavização de junções

Quando imagens diferentes são costuradas, por diversas razões as intensidades dos pixels adjacentes podem diferir o suficiente para se produzir artefatos como mostrado na figura abaixo:



Figura 58 – Artefatos oriundos da junção de imagens

Dentre as causas mencionadas anteriormente destacam-se principalmente dois fatores que contribuem para formação de artefatos: Objetos em movimento durante o momento da aquisição e mudanças expressivas na iluminação.

Dado o contexto deste projeto (mosaico para áreas agrícolas, principalmente), não se tem tantos problemas quanto a objetos em movimento. Contudo, mudanças na iluminação podem sim levar a formação de artefatos.

Diferentemente da cena exibida na Figura 58, no caso do mosaico aéreo tem-se sempre a câmera fixa, apontada em uma direção, o que reduz por si só variações na iluminação. Entretanto, o aparecimento de nuvens e etc. pode alterar a iluminação das imagens captadas gerando limites acentuados.

Para redução de tais efeitos, faz-se necessário a utilização de um algoritmo para suavização dessas junções. Na literatura, há duas abordagens mais evidenciadas: Suavização por fusão linear (Linear Blending) e fusão piramidal (Pyramid Blending) (MUJA; LOWE, 2009).

Na fusão linear, a abordagem é bem simples: Em regiões de sobreposição, o valor final do pixel é uma ponderação do pixel que vai ser sobreposto e o que irá sobrepor.

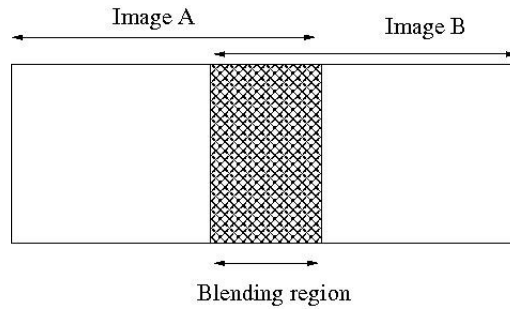


Figura 59 – Princípio de funcionamento da fusão linear

Os pixels da região comum passam a ser:

$$P(i, j) = w.A(i, j) + (w - 1).B(i, j) \quad (6.2)$$

A vantagem deste método está na facilidade da implementação e a desvantagem está na robustez. Infelizmente, a formação de fantasmas "ghosts" é favorecida quando se utiliza esta abordagem, o que pode acarretar no aparecimento de artefatos inexistentes.

Na fusão piramidal tem-se um método mais rebuscado, porém mais robusto. O processo consiste em subamostrar a interseção aplicando a Gaussiana sucessivas vezes, uma para cada escala, e em seguida, calcular o Laplaciano para cada escala a partir da diferença da imagem borrada com a Gaussiana na sub-amostragem e a expansão da escala mais baixa. Conforme ilustra a figura a seguir:

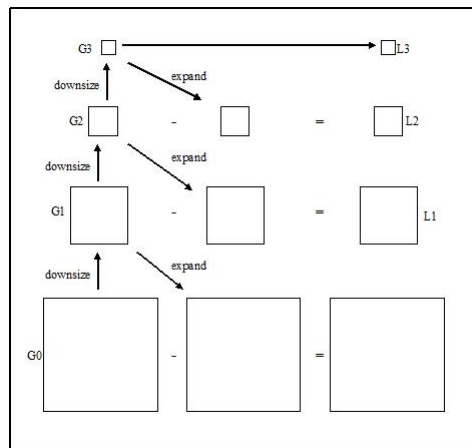


Figura 60 – Metodologia para obtenção da pirâmide

Uma vez calculados os laplacianos de cada nível para cada imagem, soma-se os dois resultados para o mesmo nível e itera-se até o nível da imagem (COURSE...,)

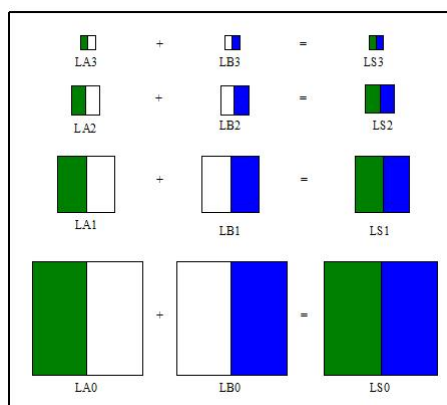


Figura 61 – Fusão dos laplacianos para cada nível da pirâmide

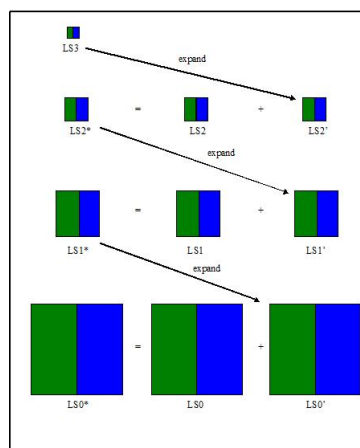


Figura 62 – Reconstrução da imagem a partir da pirâmide

A seguir uma comparação dos dois métodos para junção de imagens com problemas de alinhamento:



Figura 63 – Comparação dos métodos para imagens com desvios de alinhamento

6.1.8 Performance da Extração de características

Para avaliar qual dos algoritmos de extração de características se mostra mais afinado com as expectativas deste trabalho, fez-se um comparativo do desempenho computacional de cada um e a eficácia no que diz respeito ao reconhecimento de features em imagens agrícolas. A metodologia adotada foi a seguinte:

1. Armazenou-se num vetor o nome de todos arquivos (imagens) de um diretório de origem. Essas imagens são agrícolas, ou seja, são bem homogêneas e, portanto, problemáticas para extração de features.
2. Leu-se cada imagem a partir do seu respectivo arquivo.
3. Estimou-se o tempo de processamento para cada algoritmo usando a expressão 6.3 e registrou-se também o número de pontos identificados por cada algoritmo.

Todos os testes foram realizados no mesmo computador, em condições similares. As configurações utilizadas foram estas:

- **Processador:** Intel i3 M380 (2.53 GHz) - Quatro núcleos
- **Memória RAM:** 4GB
- **Sistema Operacional:** ArchLinux x64

É importante ressaltar que todas as implementações utilizadas fazem uso somente do processador central e não de processadores gráficos (GPU). Para estimar o custo computacional, utilizou-se a função `clock()`, definida em `time.h`. Esta função retorna o número de bordas de subida do clock desde o lançamento do programa, sendo possível portanto, calcular um Δ_t associado ao início e ao fim da execução da extração de características.

$$\Delta_t = \frac{Nbordas_{fim} - Nbordas_{inicio}}{f_{clock}} \quad (6.3)$$

6.1.9 Extração de características

A presente sessão e as seguintes utilizarão as duas imagens abaixo para implementação do processo proposto na fundamentação teórica deste trabalho:



Figura 64 – Imagens base para implementações

Utilizou-se as implementações dos algoritmos detectores de features disponibilizadas no OpenCV, no módulo Features2D. Abaixo, a saída do processamento após a detecção de características:



Figura 65 – Detecção de features para imagem base 0

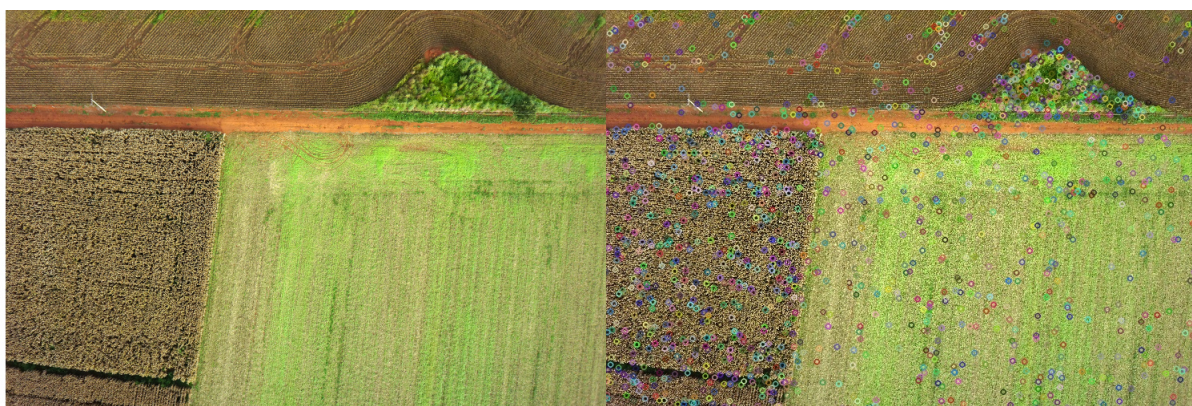


Figura 66 – Detecção de features para imagem base 1

6.1.10 Casamento de pontos-chaves

Para efetuar o casamento de pontos-chaves e encontrar os pontos-chaves detectados na Figura 65 e na Figura 66, utilizou-se a classe disponível no módulo Features2D do OpenCV.

Testou-se o desempenho do detector FLANN (Fast Approximate Nearest Neighbor) e do Brute-Force. Como esperado, o FLANN conseguiu um desempenho melhor.

Em seguida, filtrou-se os pares casados segundo um critério simplista: utilizar somente aqueles cuja distância é inferior a duas vezes a menor distância. Este critério pode ser evoluído.



Figura 67 – Casamento dos pontos-chaves encontrados anteriormente

De posse dos matches devidamente filtrados da seção anterior, selecionou-se três pares e estimou-se a matriz de transformação. Em seguida, esta transformação foi aplicada na segunda imagem, buscando anexá-la a primeira para construção do mosaico:



Figura 68 – Estimação da matriz e sobreposição das duas imagens adjacentes

Percebe-se, que desde que as etapas de matching e filtragem tenham sido cor-

retamente implementadas, a matriz de transformação estimada é boa o suficiente para sobreposição.

Na Figura 68 não foi implementado a suavização de junções usando o método indicado na seção 6.1.7. Espera-se portanto uma qualidade ainda maior na sobreposição final. O pequeno círculo branco, indica o centroide dos três pontos em ambas as imagens, durante a implementação optou-se por marcá-lo na foto, para validar a sobreposição.

6.2 Performance dos algoritmos de detecção de features

Utilizando-se a metodologia descrita na seção 6.1.8, obteve-se as seguintes métricas:

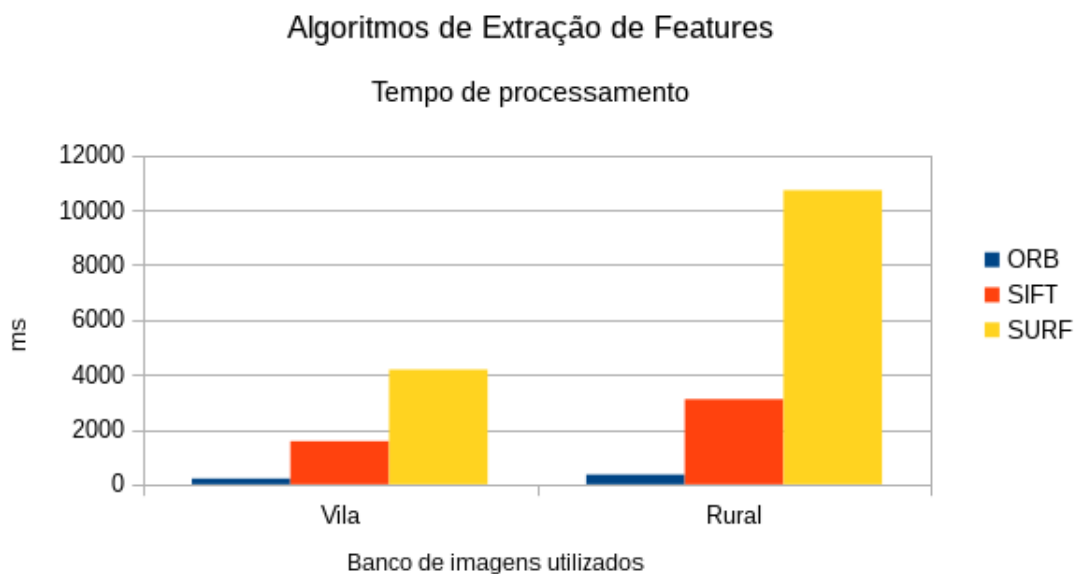


Figura 69 – Tempo de processamento para cada algoritmo

Parâmetro	ORB	SIFT	SURF
Tempo médio	209 ms	1570 ms	4181 ms
Features Detectadas	32807	4960	9216
Qualidade Subjetiva	Ruim	Boa	Média

Tabela 10 – Valores obtidos para as amostras do banco de imagens de uma vila

Parâmetro	ORB	SIFT	SURF
Tempo médio	355 ms	3102 ms	10716 ms
Features Detectadas	45521	15390	28615
Qualidade Subjetiva	Péssima	Regular	Regular

Tabela 11 – Valores obtidos para as amostras do banco de imagens agrícolas

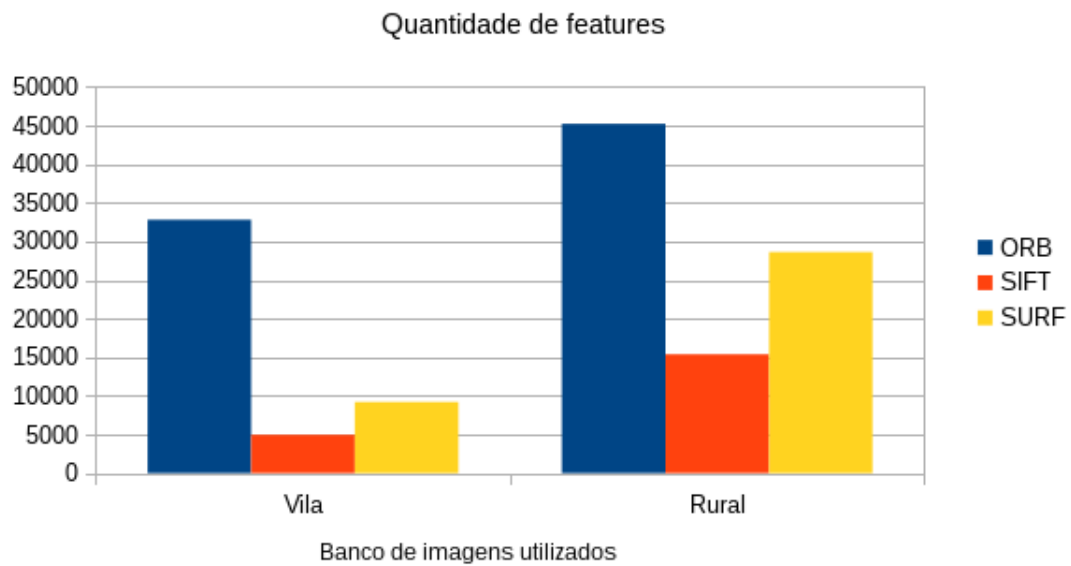


Figura 70 – Quantidade de features identificadas por cada algoritmo

Percebe-se inicialmente, que o ORB aparentemente possui um desempenho muito superior aos demais, contudo, no quesito análise subjetiva, percebeu-se que na verdade, as características identificadas não possuíam boa qualidade, e eram na verdade ruídos que cobriam toda a área homogênea da imagem. Não sendo possível portanto, casar essas características em duas fotos adjacentes.

Optou-se portanto, pelo algoritmo SIFT, que possui um tempo de execução inferior ao SURF, e que gera ponto-chaves com qualidade muito boa. Em situações onde a detecção pode ser prejudicada, o SURF pode ser interessante, contudo, ele torna o processo quase duas vezes mais lento.

Referências

ALUMÍNIO, A. A. B. do. *Propriedades Mecânicas do alumínio*. 2014. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/propriedades-mecanicas/>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 20.

ANAC. *REQUISITOS OPERACIONAIS: OPERAÇÕES COMPLEMENTARES E POR DEMANDA*. [S.l.], 2010. REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/arquivos/pdf/Audiencias2010/anexo%20RBAC%20135%20.pdf>>. Citado na página 18.

ARAUJO, I. R. D. et al. Calculo de ndvi no suporte ao estudo de desertificação no município de orocó pe. In: . [S.l.]: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2010. p. 1 – 6. Citado na página 16.

ARCGIS. *Coordinate systems, map projections, and geographic (datum) transformations*. 2008. Disponível em: <<http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisengine/dotnet/89b720a5-7339-44b0-8b58-0f5bf2843393.htm#GeographicTransformations>>. Citado na página 44.

ARDUCOPTER. *Motors and servos orders for APM 2 board*. 2014. Disponível em: <https://code.google.com/p/arducopter/wiki/APM2_Motor_order>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 19.

ARDUPILOT. *Mission Planner*. 2014. Disponível em: <<http://planner.ardupilot.com/>>. Citado na página 25.

BOSAK, K. *Secrets of UAV photomapping*. 2009. Disponível em: <<http://www.aerialrobotics.eu/pteryx/pteryx-mapping-secrets.pdf>>. Citado na página 26.

CARVALHEDO, F. D. P.; SIQUEIRA, T. M. *Aplicação do algoritmo TLD para identificação e rastreamento de veículos em imagens capturadas por aeronaves não-tripuladas*. Dissertação (Monografia de Graduação) — Universidade de Brasília - UnB, 2013. Disponível em: <http://bdm.unb.br/bitstream/10483/6936/1/2013_ThiagoMarquesSiqueira_FilipePaulaCarvalho.pdf>. Citado na página 19.

COURSE Lectures of Computation Photography - Blending. Citado na página 71.

DOC. OPENCV 2.8. *Camera Calibration with OpenCV*. 2014. Disponível em: <docs.opencv.org/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html>. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.

EUROAKTION. *TABELA DE DENSIDADE DOS MATERIAIS*. 2014. Disponível em: <<http://www.euroaktion.com.br/Tabela%20de%20Densidade%20dos%20Materiais.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 20.

FILHO, G. L. S.; RUDIGER, G. T.; NASCIMENTO, J. P. M. D. *QUADRICOPTERO*. 2011. Citado na página 20.

FLIGHT, F. *Digital Aerial Photography and Remote Sensing*. 2014. Disponível em: <<http://focalflight.com/imageresolution.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 26.

- GDAL. *Geospatial Data Abstraction Library*. 2014. Disponível em: <<http://www.gdal.org/>>. Citado na página 44.
- GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. *Processamento de imagens digitais*. [S.l.: s.n.], 2000. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 28.
- GROUP, C. *Image sensor sizes & crop factors*. 2014. Disponível em: <<http://cvp.com/index.php?t=helpCentre/page/39/image+sensor+size+comparison>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 24.
- INTERNATIONAL, G. *UAS en los Andes*. 2014. Disponível em: <<http://pix4d.com/wp-content/uploads/2013/04/GIM-International-es-full.pdf>>. Citado na página 16.
- JÚNIOR, M. C. D. S.; PINTO, F. D. A. C. Utilização de imagens multiespectrais para detectar diferentes níveis nutricionais na forrageira brachiaria decumbens. Citado na página 33.
- JÚNIOR, L. R. A.; CÔRTEZ, J. B. R.; FERREIRA, M. E. Validação de mosaicos aerofotogramétricos utilizando fotografias obtidas com câmara digital não métrica acoplada a um vant. 2014. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/603/CT04-101_1404786002.pdf>. Citado na página 15.
- KALAL, Z. Forward-backward error: Automatic detection of tracking failures. *International Conference on Pattern Recognition*, 2010. Citado na página 69.
- LOWE, D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 2004. Citado na página 66.
- MUJA, M.; LOWE, D. G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 70.
- PALERMO, R. de A.; LEITE, T. C. *Integração de Levantamento Fotogramétrico Aéreo com o uso de Vant e Levantamento Fotogramétrico Terrestre Para o Mapeamento Tridimensional das Ruínas de São Miguel das Missões*. [S.l.]: UFRS - Universidade Federal do Rio, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 8, 23, 24, 25 e 27.
- RAY, H. Surf: Speeded up robust features. 2008. Citado na página 66.
- RUBLEE, E. Orb: an efficient alternative to sift or surf. 2011. Citado na página 66.
- SONY. *Especificações técnicas Sony NEX-7*. 2014. Disponível em: <<http://www.sony.pt/support/pt/content/cnt-specs/NEX-7/list>>. Citado na página 27.
- SUPERTRAT, G. *PROPRIEDADES MECANICAS DOS METAIS*. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 20.
- TARALLO, A. de S. *Construção Automática de Mosaicos de Imagens Digitais Aéreas Agrícolas Utilizando Transformada SIFT e Processamento Paralelo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2013. Citado na página 68.
- TOMMASELLI, A. M. G. *Fotogrametria Básica*. [S.l.]: UNESP - Universidade Estadual Paulista, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 8, 23 e 27.

VIOLATO, G. V. Estudo do funcionamento e do processo de escolha de hélices para um veículo aéreo não-tripulado. *Decimo Segundo Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA XII ENCITA / 2006*, 2006. Disponível em: <<https://redmine.fe.up.pt/attachments/download/3324/AER-02.pdf>>. Citado na página 21.

WORLD, G. *Revolution in Data acquisition sows new seeds*. 2014. Disponível em: <http://pix4d.com/wp-content/uploads/2013/04/2014_Geospatial-World_Precision-Agriculture.pdf>. Citado na página 16.